



HAL
open science

Diagnostic de défauts et commande tolérante aux défauts des systèmes à énergie renouvelable

Abderrahmane Jarrou

► **To cite this version:**

Abderrahmane Jarrou. Diagnostic de défauts et commande tolérante aux défauts des systèmes à énergie renouvelable. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0052 . tel-02941950

HAL Id: tel-02941950

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02941950>

Submitted on 17 Sep 2020

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Diagnostic de défauts et commande tolérante aux défauts des systèmes à énergie renouvelable

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 13 Juillet 2020

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(mention Automatique, Traitement du signal et des images, Génie informatique)

par

Abderrahmane JARROU

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Belkacem OULD BOUAMAMA Jérôme BOSCHE	Professeur Université de Lille MCF HDR, Université d'Amiens
<i>Examineurs :</i>	Nicolas HERAUD Marion MARTINY Frédéric HAMELIN	MCF HDR, Université de Corse Professeur, Université de Lorraine Professeur, Université de Lorraine
<i>Directeur de thèse :</i>	Dominique SAUTER	Professeur, Université de Lorraine

Remerciements

Je souhaite exprimer ma plus sincère reconnaissance à Monsieur Dominique Sauter pour la confiance qu'il a eu en m'offrant la possibilité d'effectuer cette thèse et de l'avoir dirigé. Ses qualités scientifiques et humaines, ses idées et ses conseils ont été d'une grande importance. Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Kamal Daissaoui, directeur générale de l'EMSI (l'école marocaine des sciences de l'ingénieur) et Monsieur Karim Alami directeur académique de l'EMSI de leur appui pour le bon déroulement du travail.

Que messieurs les rapporteurs, Monsieur Belkacem Ould Bouamama et Monsieur Jérôme Bosch soient remerciés pour les remarques et questions pertinentes qui ont permis d'améliorer la qualité du travail. Je tenais aussi à remercier Madame Marion Martiny, Monsieur Nicolas Héraud, et Monsieur Frédéric Hamelin d'avoir accepté d'examiner la thèse.

Je remercie également tous les membres du CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) surtout les membres du département CID. De même, je tiens à remercier tous mes collègues enseignants et administratifs de l'EMSI, en particulier les membres du laboratoire LPRI, pour l'ambiance sympathique du travail.

Je n'oublie pas mes amis et mes étudiants pour les échanges intéressants.

Finalement, une pensée toute particulière pour ma grand-mère, mes parents, mes sœurs, ma belle mère et ma chère fiancée pour leur présence et leur soutien tout au long de ces années de travail. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et mon amour. Cette thèse leur est dédiée.

*Je dédie cette thèse
à ma famille.*

Table des matières

Table des figures	xiii
-------------------	------

Liste des tableaux	xvii
--------------------	------

Chapitre 1

Introduction générale	1
-----------------------	---

1.1 Contexte énergétique	1
1.2 Énergétique des bâtiments	2
1.3 Objectifs de la thèse	4
1.4 Plan du document	4

Chapitre 2

Système à énergie renouvelable	7
--------------------------------	---

2.1 Introduction	8
2.2 Description des équipements de production, consommation et stockage d'énergie électrique	8
2.2.1 Éolienne	8
2.2.2 Panneaux photovoltaïques	12
2.2.3 Batteries	16
2.2.4 Pompe à chaleur	19
2.2.5 Système hybride de production d'énergie électrique	21
2.3 Système étudié	23
2.3.1 Micro-réseau :	23
2.3.2 Chauffage du bâtiment :	25

2.4	Simulation TRNSYS et problématiques	26
2.4.1	Micro-réseau :	26
2.4.2	Chauffage du bâtiment :	27
2.5	Conclusion	29

Chapitre 3	
Modélisation et Identification	31

3.1	Introduction	32
3.2	Éolienne	32
3.3	Panneaux photovoltaïques	36
3.4	Batteries	38
3.5	Interaction avec le réseau public	40
3.6	Pompe à chaleur	41
3.7	Bâtiment	42
3.7.1	Modèle Monozone	44
3.7.2	Modèle Multi-zones	48
3.8	Données Météorologiques	54
3.8.1	Vitesse du vent	54
3.8.2	Température	55
3.8.3	Rayonnement solaire	55
3.9	Conclusion	59

Chapitre 4	
Commande prédictive MPC	61

4.1	Introduction	62
4.2	Principe de fonctionnement	63
4.2.1	Principe de base	63
4.2.2	Éléments de la commande prédictive	64
4.2.2.1	Modèle	64
4.2.2.2	Critère d'optimisation	64

4.2.2.3	Contraintes	65
4.2.2.4	Optimiseur	66
4.3	Formulation de la commande prédictive	66
4.3.1	Formulation de base	66
4.3.1.1	Prédictions	66
4.3.1.2	Fonction de coût et résolution du problème d'optimisation	69
4.3.2	Commande prédictive avec feedforward	71
4.3.3	Commande prédictive avec contraintes :	72
4.3.4	Commande prédictive distribuée	75
4.3.4.1	Principe de la commande prédictive distribuée	76
4.3.4.2	Décomposition du problème d'optimisation	76
4.4	Résultat de simulation	78
4.4.1	Analyse du contrôleur MPC	78
4.4.1.1	Impact des horizons de prédiction	78
4.4.1.2	Impact des poids de pondération	81
4.4.1.3	Impact des incertitudes paramétriques	82
4.4.2	Efficacité du contrôleur MPC	83
4.4.3	Application MPC pour le management d'énergie du micro-réseau	84
4.4.4	Application de la commande prédictive distribuée	87
4.5	Conclusion	91

Chapitre 5

Diagnostic de défauts et commande tolérante aux défauts
--

93

5.1	Introduction	95
5.2	Concepts fondamentaux du diagnostic de défauts et de la commande tolérante aux défauts	95
5.2.1	Définitions générales	95
5.2.2	Classification des défauts	95
5.2.3	Modélisation des défauts	97

5.2.4	Diagnostic de défauts FDI	99
5.2.5	Synthèse d'observateurs pour le diagnostic	100
5.2.5.1	Observabilité	100
5.2.5.2	Observateur de Luenberger	100
5.2.5.3	Filtre de Kalman	101
5.2.6	Commande tolérante aux défauts FTC	103
5.2.6.1	Méthodes passives PFTC	104
5.2.6.2	Méthodes actives AFTC	105
5.2.7	Analyse du système global FDI/FTC	107
5.3	Contributions au diagnostic de défauts et à la commande tolérante aux défauts .	109
5.3.1	Approche linéaire	109
5.3.1.1	Conception de filtres isolateurs de défauts	109
5.3.1.2	Reconfiguration du contrôle	111
5.3.2	Approches bi-linéaires	112
5.3.2.1	Conception d'observateurs bilinéaires	112
5.3.2.2	Structuration des résidus pour l'isolation des défauts de capteurs	114
5.3.2.3	Structuration des résidus pour l'isolation des défauts d'actionneurs	117
5.3.2.4	Reconfiguration du contrôle	118
5.4	Application au système à énergie renouvelable	120
5.4.1	Application du filtre linéaire à un bâtiment multizone	121
5.4.2	Application de l'observateur bilinéaire à un bâtiment multizone	123
5.4.2.1	Diagnostic défaut capteur	124
5.4.2.2	Diagnostic défaut actionneur	125
5.4.2.3	Compensation des défauts actionneur	126
5.4.3	Défaut capteur de température du bâtiment	129
5.4.4	Défaut actionneur pompe à chaleur	130
5.4.5	Défaut procédé batteries de stockage	132
5.5	Conclusion	133

Chapitre 6**Conclusion générale****135****Bibliographie****139**

Table des figures

2.1	Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical	8
2.2	Différents types d'éoliennes à axe verticale	9
2.3	Différents types d'éoliennes à axe horizontal	9
2.4	Eoliennes à axe horizontal (a) amont, (b)aval	9
2.5	Système d'entraînement mécanique	10
2.6	Génératrice	10
2.7	Éolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone à cage	11
2.8	Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un convertisseur pleine puissance	11
2.9	Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation	12
2.10	Principe de fonctionnement d'une cellule "effet photovoltaïque"	13
2.11	Différents types de cellule photovoltaïques à base de silicium	13
2.12	Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un générateur PV pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés	14
2.13	Comportement des caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ sous l'influence de; ((a)) et((b)) : l'éclairement à température fixe, ((c))et((d)) : la température à éclairement fixe.	15
2.14	Caractéristiques $I(V)$ résultante de l'association de modules en parallèle	16
2.15	Caractéristiques $I(V)$ résultante de l'association de modules en série	16
2.16	Batterie au plomb	16
2.17	Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb	17
2.18	Pompe à chaleur	19
2.19	Machine frigorifique	20
2.20	Exemple de système hybride avec bus à courant alternatif	22
2.21	Exemple de système hybride avec bus à courant continu	22
2.22	Différents type de convertisseur statique de puissance	23

2.23	Système de production/stockage	24
2.24	Système de chauffage	25
2.25	Système de production/stockage sur Trnsys	27
2.26	Résultat de simulation du système production/stockage sur Trnsys	27
2.27	Système de chauffage sur Trnsys	28
2.28	Résultats de simulation du système de chauffage sur Trnsys	28
2.29	Rayonnement solaire reçu par le bâtiment	29
3.1	Courbe de puissance idéale	33
3.2	Captage de l'énergie cinétique du vent	34
3.3	Puissance produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent	35
3.4	Vitesse du Vent	35
3.5	Puissance produite par l'éolienne	36
3.6	Puissance produite en fonction de l'irradiation solaire	38
3.7	Irradiation solaire incident sur les surfaces des panneaux	38
3.8	Puissance produite par les panneaux photovoltaïques	39
3.9	Pompe à chaleur	41
3.10	Température de chauffage en fonction de la température extérieure	42
3.11	Température de chauffage en fonction du signal de commande	43
3.12	Bâtiment Monozone	45
3.13	Bâtiment Multizone	51
3.14	Algorithme de prédiction de la vitesse du vent	54
3.15	Vitesse de vent prédite Vs Vitesse de vent mesurée pour différents horizons de prédiction	55
3.16	Température ambiante prédite Vs Température ambiante mesurée	56
3.17	Différents types de rayonnement	56
3.18	Rayonnement solaire direct sur la surface horizontale	57
3.19	Rayonnement solaire diffus sur la surface horizontale	57
3.20	Rayonnement solaire incident sur une surface inclinée.	57
3.21	Rayonnement solaire total reçu par les différentes surfaces	59
4.1	Principe du MPC sur un horizon glissant	63
4.2	structure du contrôleur MPC	71
4.3	Architecture de commande centralisée	75
4.4	Architecture de commande décentralisée	75

4.5	Architecture de commande distribuée	76
4.6	Décomposition du système globale en sous système	76
4.7	Influence de l'horizon de prédiction $H_p = 2$ (12 min)	79
4.8	Influence de l'horizon de prédiction $H_p = 10$ (1 heure)	79
4.9	Influence de l'horizon de prédiction $H_p = 50$ (5 heures)	79
4.10	Influence de l'horizon de prédiction $H_p = 10$ (1 heure)	80
4.11	Influence de l'horizon de prédiction $H_p = 50$ (5 heures)	80
4.12	Influence des Poids de pondération $Q = R$	81
4.13	Influence des Poids de pondération $Q \gg R$	81
4.14	Influence des Poids de pondération $Q \ll R$	82
4.15	Isolation surestimée	82
4.16	Isolation sous estimée	83
4.17	Comparaison MPC VS PID	83
4.18	Système de gestion d'énergie	85
4.19	Résultat du contrôleur heuristique pour la gestion d'énergie	86
4.20	Résultat du contrôleur MPC pour la gestion d'énergie	87
4.21	Évolution de l'indicateur de performance I_r	87
4.22	Régulation température du bâtiment	90
4.23	Gestion d'énergie	90
4.24	DMPC pour régulation température du bâtiment	91
4.25	DMPC pour gestion d'énergie	91
5.1	Evolution temporelle des défauts	96
5.2	Différents types de défauts affectant un système physique	96
5.3	Modélisation des défauts	97
5.4	Observateur de Luenberger	102
5.5	Filtre de Kalman	103
5.6	Structure générale du système tolérant aux défauts.	104
5.7	Types des systèmes tolérants aux défauts.	104
5.8	Le principe de la commande PFTC pré calculée.	105
5.9	Schéma de diagnostic de type DOS	114
5.10	Schéma de diagnostic de type GOS	115
5.11	Architecture FDI/FTC centralisée	120
5.12	Architecture FDI/FTC décentralisée	120
5.13	Architecture FDI/FTC distribuée	120

5.14	Décomposition du système selon une architecture distribuée	121
5.15	Estimation du défaut de l'entrée	121
5.16	Control reconfiguration	122
5.17	Actions de commande dans le cas nominal et après reconfiguration	122
5.18	Mesures et estimations de la température zone 1	123
5.19	Résidus générés à partir d'un modèle linéarisé et à partir d'un modèle bi-linéaire	123
5.20	Résidus généré par un observateur dédié piloté par T_1 (DOS 1)	124
5.21	Résidus généré par un observateur dédié piloté par T_2 (DOS 2)	124
5.22	Résidus généré par un observateur dédié piloté par T_3 (DOS 3)	124
5.23	Résidus généré par un observateur (entrée inconnue 3)	125
5.24	Résidus générés par un observateur (entrée inconnue 2)	125
5.25	Résidus générés par un observateur (entrée inconnue 1)	126
5.26	Estimation d'une perte d'efficacité d'un actionneur de débit air	127
5.27	Phénomène de saturation lié à la perte d'efficacité	128
5.28	Reconfiguration de la commande contre la perte d'efficacité de l'actionneur . . .	128
5.29	Différentes températures avec défaut capteur avant accommodation	129
5.30	Différentes températures avec défaut capteur après accommodation	130
5.31	Commandes en cas nominal et avec défaut avant et après accommodation	130
5.32	Température de chauffage en fonctionnement normal et en présence de défaut avant et après accommodation	131
5.33	Commande en fonctionnement normal et en présence de défaut avant et après accommodation	132
5.34	État de charge en fonctionnement nominal et en présence de défaut avant et après re-configuration	133

Liste des tableaux

3.1	Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque	37
3.2	Analogie thermodynamique électrique	44
3.3	Paramètres du bâtiment.	53
3.4	Azimut et inclinaison des surfaces	58
4.1	Comparaison MPC VS PID	84

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte énergétique

Le fondement de tout progrès, voire de toute vie, est l'énergie. L'énergie permet à tout système de fonctionner : le chauffage, l'éclairage, l'eau, l'éducation et l'apprentissage, la santé, la technologie, la fabrication et la mobilité. La consommation d'énergie a augmenté d'environ 45% au cours des 20 dernières années. Et pourtant, ce n'est que le début, car les personnes qui n'ont pas un accès fiable à l'énergie sont encore nombreuses sur cette planète, dont plus d'un milliard n'ont pas du tout accès à l'électricité. La consommation d'énergie est prévue d'augmenter de 35% supplémentaires au cours des 20 prochaines années, dans le cadre de la poursuite du développement qui a commencé il y a quelques décennies [Pet17].

La consommation d'énergie dans les bâtiments est environ 40% de la consommation totale d'énergie. Les bâtiments résidentiels représentaient 75% de ce total, et le secteur tertiaire le reste. Le secteur tertiaire représente l'ensemble des bâtiments commerciaux et industriels qui accueillent les différentes entreprises de services. La consommation d'énergie par l'industrie représente environ un tiers de la consommation totale d'énergie. Environ 30% de cette quantité correspond à l'énergie utilisée par les industries de transformation et aux pertes d'énergie associées lors de la conversion de l'énergie primaire en une forme utilisable dans les secteurs de consommation finale. Et le transport correspond à environ un tiers de la consommation totale d'énergie.

Mais cela ne peut plus continuer comme avant : L'utilisation et la production d'énergie sont également les principales causes du changement climatique, car elles sont les principales sources d'émissions de carbone. Les combustibles fossiles représentent toujours plus de 80% de l'énergie primaire totale consommée dans le monde. Avec les combustibles fossiles viennent les émissions de gaz à effet de serre, qui ont déjà atteint un niveau sans précédent dans l'histoire de notre planète et qui continuent d'augmenter. Les conséquences sur la durabilité sont déjà visibles et continueront à s'aggraver dans les prochaines décennies. Les scientifiques ont estimé que le niveau des émissions doit être réduit de manière importante pour éviter des conséquences catastrophiques.

L'humanité est maintenant confrontée à une équation compliquée à résoudre, qui commence à ressembler à une impasse énergétique. D'une part, le développement entraînera une augmentation de la demande énergétique. D'autre part, les émissions de CO₂ doivent être réduites afin de limiter sa concentration dans l'atmosphère.

Un changement complet de paradigme est nécessaire pour résoudre l'équation énergétique. Bon nombre des principaux acteurs de ce changement comprennent déjà les conséquences dramatiques de l'inaction et ont mis au point des plans élaborés de réduction de la consommation énergétique.

La réduction de la consommation finale est une exigence majeure. Une grande partie des économies potentielles résultant de l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation finale devrait cependant être réalisée. Compte tenu de l'inertie de tous les secteurs (bâtiment, industrie et transport), cela semble hors de portée. Le remplacement de la production d'électricité conventionnelle par des énergies renouvelables et, plus généralement, le remplacement d'autres combustibles conventionnels utilisés pour le chauffage ou le transport par des énergies renouvelables sont donc obligatoires pour atteindre le niveau d'économie d'énergie souhaité. La rénovation des bâtiments et les contrôles actifs, l'intégration des énergies renouvelables et la gestion de la chaleur résiduelle dans les processus industriels, des transports plus intelligents, de nouvelles technologies de motorisation et la transition de la production d'électricité vers les énergies renouvelables sont autant d'actions qui ont déjà été lancées dans la plupart des pays où les enjeux sont importants.

1.2 Énergétique des bâtiments

Les bâtiments représentés par les secteurs résidentiel et tertiaire (logement, bureaux, magasins, écoles, restaurants, hôtels, hôpitaux, musées . . .) sont les plus importants consommateurs d'énergie, suivis par le secteur du transport et par l'industrie. L'intérêt dans cette thèse est porté au secteur du bâtiment.

La consommation d'énergie dans les bâtiments est composée d'un certain nombre d'éléments qui, selon l'utilisation et les conditions d'occupation, peuvent varier. La principale utilisation de l'énergie dans les bâtiments est le chauffage des locaux et de l'eau. Viennent ensuite l'éclairage et la cuisson, puis les appareils tels que les téléviseurs, les réfrigérateurs, les machines à laver, etc.

Si l'on affine plus l'analyse de ce secteur, le système de chauffage est de loin le système le plus gourmand en énergie étant responsable de plus de la moitié de la consommation. Ce besoin en chauffage dépend de plusieurs facteurs, la température extérieure est le facteur le plus important agissant sur la demande de chauffage (plus il fait froid, plus le besoin en énergie pour le chauffage augmente). Un autre facteur très important est la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment (parois, fenêtres. . .), plus les éléments de construction extérieurs ne permettent pas une bonne isolation, plus il y aura de chaleur perdue par échange avec l'extérieur. L'efficacité du système de chauffage (technologie, rendement, commande...) joue également un rôle important ainsi que le mode de vie des occupants qui a aussi un effet considérable sur la

facture énergétique totale.

Pour réduire la consommation énergétique des bâtiments, les exigences des réglementations et standards concernant les bâtiments ne cessent d'augmenter par rapport aux problématiques liées à l'enveloppe et l'isolation thermique. Pour les nouveaux bâtiments au stade de la conception, plusieurs paramètres importants pour l'efficacité énergétique peuvent être considérés : l'orientation de l'immeuble, l'orientation des fenêtres et les matériaux de construction, etc. Pour les bâtiments existants, les travaux de rénovation sont stimulés, en particulier le double vitrage, l'installation de volets et l'isolation des planchers ou des toits.

L'amélioration de la qualité de l'enveloppe reste insuffisante, l'accent doit être mis ensuite sur le système de chauffage, de climatisation, de ventilation et d'eau chaude, éléments qui sont responsables d'environ trois quarts de la demande énergétique des logements. Le choix judicieux d'un système HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) est fondamental, la pompe à chaleur est un équipement en particulier qui a suscité beaucoup d'intérêt dernièrement pour ses performances, ce système permet d'apporter une considérable réduction d'énergie et s'inscrit dans la démarche de développement durable. Un système HVAC doit permettre de maîtriser la température d'ambiance, l'humidité de l'air et le niveau d'hygiène (CO₂, polluants, particules, odeurs, etc.)

Malheureusement, de nombreux systèmes HVAC présentent de mauvaises performances parce que l'importance de la commande a été sous-estimée par les producteurs. En effet la majorité des installations sont contrôlées par une loi de commande simple, de type Tout Ou Rien ou PID. D'où la nécessité de l'utilisation d'un système de commande avancée pour améliorer les performances du système HVAC.

Une autre solution en plein expansion qui permettra aux bâtiments dans le cadre de rénovation ou de la construction neuve de réduire leurs besoins en énergie, voire d'être en surplus de production est l'intégration d'un système à énergie renouvelable. En effet, en raison des programmes d'incitation gouvernementaux en faveur des systèmes à énergie renouvelable dans le monde entier, le nombre de petites unités de production appelées micro-réseau (micro-grid) a augmenté de façon remarquable.

Les micro réseaux contenant des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie éolienne et solaire, deviennent rapidement le pilier du futur système électrique, parallèlement les systèmes de stockage sont devenus plus fiables, moins chers et plus propres, rendant ainsi viable la possibilité de stocker l'énergie pour faire face à la nature intermittente de la production électrique renouvelable. Mais pour que le micro-réseau soit efficace, un système de commande optimale est nécessaire pour le management d'énergie entre la production, stockage et consommation [LSBN⁺17].

Le système de commande que ce soit pour la régulation thermique du bâtiment ou le management d'énergie du micro-réseau doit présenter un certain degré d'intelligence de manière à assurer un fonctionnement optimal. D'autant plus qu'aujourd'hui, les systèmes automatisés sont soumis à des contraintes de rendement de plus en plus exigeantes entraînant de ce fait l'application de commandes toujours plus performantes, non seulement dans le cas du fonctionnement nominal mais aussi en cas d'apparition de défaut. Ceci conduit à la notion générale de systèmes de commande tolérante aux défauts.

1.3 Objectifs de la thèse

À la lumière de la discussion ci-dessus, la thèse étudie un système à énergie renouvelable qui peut être intégré dans un bâtiment afin d'améliorer ses performances énergétiques. Ce système comprend un micro-réseau pour la production et stockage d'énergie (éolienne, panneaux photovoltaïques et batteries) et des éléments de charge (pompe à chaleur) qui consomment de l'énergie électrique pour assurer le chauffage thermique du bâtiment.

L'objectif sera de développer et d'appliquer la commande prédictive pour le chauffage du bâtiment et la gestion d'énergie du micro-réseau intégré, l'intérêt est de profiter de son effet anticipatif pour prendre en compte :

- les prévisions météorologiques (température extérieure, rayonnement solaire, vitesse du vent)
- le profil d'occupation.

De plus, cette technique présente l'avantage de traiter naturellement les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) et permet de considérer explicitement les contraintes de fonctionnement lors la résolution du problème d'optimisation pour calculer les signaux de commande.

L'objectif de la thèse sera également de développer des méthodes qui soient en mesure de diagnostiquer les défauts et de s'adapter à des situations de défaillance tout en optimisant l'efficacité énergétique du bâtiment et en assurant la sûreté de fonctionnement du système de contrôle.

La thèse propose également d'étudier une stratégie de commande et de diagnostic de défaut distribuée basée sur la décomposition du système en un ensemble de sous systèmes qui coopèrent pour converger vers la solution optimale globale dans le cas d'un bâtiment de grandes dimensions.

1.4 Plan du document

Voici une brève description du contenu de chaque chapitre de ce rapport.

Le chapitre 2 décrit les équipements à énergie renouvelable étudiés dans ce rapport pour la production, stockage et consommation d'énergie (éolienne, panneaux photovoltaïques, batteries, pompe à chaleur) , puis le fonctionnement de ces équipements en tant qu'un seul système est étudié, ensuite ce système est simulé sur le logiciel TRNSYS.

Dans le chapitre 3 nous procédons à la modélisation mathématique de l'ensemble des équipements présentés dans le chapitre 2. De plus, le modèle de bâtiment est introduit dans un contexte mono-zone, puis étendu à un bâtiment multi-zones. Les données météorologiques qui affectent le système (température ambiante, vitesse de vent, rayonnement solaire) sont également modélisées.

Dans le chapitre 4, nous développons une stratégie de commande prédictive (MPC) que nous appliquerons pour la régulation de la température du bâtiment et pour le management d'énergie afin de gérer les flux de puissance produite, stockée et consommée ou échangée avec le réseau électrique public. Les résultats du MPC sont comparés aux résultats des contrôleurs classiques

généralement utilisés (PID, algorithme heuristique). Enfin une approche de commande prédictive distribuée (DMPC) est développée.

Le chapitre 5 passe d'abord en revue les différents types de défauts, les principales méthodes de diagnostic de défauts et de commandes tolérantes aux défauts dans des systèmes dynamiques d'une manière générale. Puis un ensemble de défauts concrets pouvant affecter le système étudié sont traités en montrant comment les détecter et comment la commande prédictive MPC pourrait y faire face pour assurer la continuité de service en mode dégradé. Enfin on présente la conception et l'application de deux types de filtres d'abord dans le cas d'un modèle linéaire puis bi-linéaire.

Chapitre 2

Systeme à energie renouvelable

Contents

2.1	Introduction	8
2.2	Description des équipements de production, consommation et stockage d'énergie électrique	8
2.2.1	Éolienne	8
2.2.2	Panneaux photovoltaïques	12
2.2.3	Batteries	16
2.2.4	Pompe à chaleur	19
2.2.5	Système hybride de production d'énergie électrique	21
2.3	Système étudié	23
2.3.1	Micro-réseau :	23
2.3.2	Chauffage du bâtiment :	25
2.4	Simulation TRNSYS et problématiques	26
2.4.1	Micro-réseau :	26
2.4.2	Chauffage du bâtiment :	27
2.5	Conclusion	29

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les équipements de production, stockage et consommation d'énergie renouvelable qui peuvent être intégrés dans le bâtiment, leurs types, caractéristiques et principes de fonctionnement. Ensuite, ces équipements sont associés et connectés pour former un système à énergie renouvelable complet présenté dans la partie suivante. Ce système fera l'objet de l'étude dans le reste du rapport, la première phase de son étude étant la simulation présentée dans la quatrième partie sous le logiciel TRNSYS. L'analyse de la simulation permet de mieux comprendre le système. Cette analyse permet de fixer les problématiques et objectifs de l'étude.

2.2 Description des équipements de production, consommation et stockage d'énergie électrique

2.2.1 Éolienne

L'éolienne est un système qui transforme l'énergie cinétique disponible dans le vent en énergie électrique, elle est composée d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique sert à capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie mécanique rotative. Cette dernière est transmise via un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse, à une génératrice électrique. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est effectuée via la génératrice électrique.

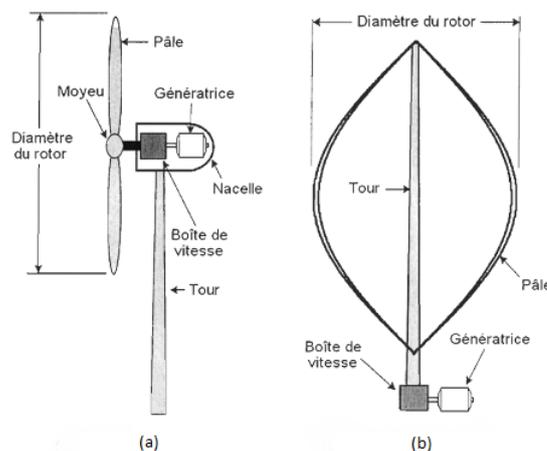


FIGURE 2.1 – Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical

Deux grandes classes d'éoliennes sont présentes dans l'industrie, à savoir les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical comme l'illustre la figure 2.1. Les éoliennes à axe horizontal sont composées principalement d'une tour au sommet de laquelle une nacelle est installée. Cette nacelle supporte le rotor de l'éolienne (moyeu et pales) et comporte le système d'entraînement ainsi que la génératrice. L'axe de rotation du rotor de la turbine est donc horizontal. Pour ce qui est des éoliennes à axe vertical, l'axe de rotation du rotor est perpendiculaire au sol. Ceci

permet de placer le système d'entraînement ainsi que la génératrice au niveau du sol.

Plusieurs types d'éoliennes à axe vertical sont disponibles (figure 2.2).

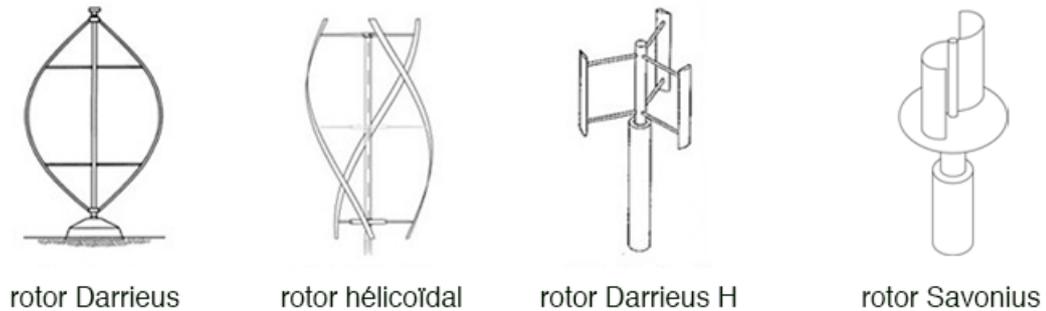


FIGURE 2.2 – Différents types d'éoliennes à axe verticale

La presque totalité des turbines éoliennes rencontrées est à axe horizontal. Habituellement, les éoliennes à axe horizontal sont composées d'une, deux ou trois pales, quoiqu'on retrouve une majorité de turbines à trois pales (figure 2.3).



FIGURE 2.3 – Différents types d'éoliennes à axe horizontal

Le choix du nombre de pales est fonction de différents facteurs dont le coût, la performance, les charges mécaniques en présence, l'impact sur l'entraînement mécanique et son coût, le bruit et l'apparence visuelle du rotor [B⁺01]. Il existe deux sortes d'éoliennes à axe horizontal, les éoliennes "amont" et les éoliennes "aval" (figure 2.4).

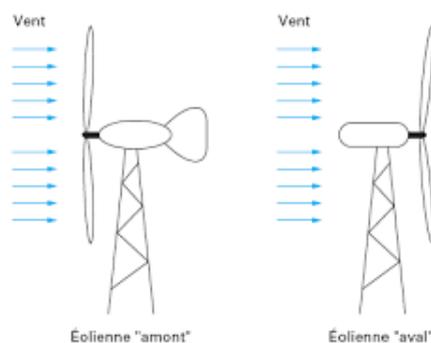


FIGURE 2.4 – Eoliennes à axe horizontal (a) amont, (b)aval

Dans le fonctionnement des éoliennes "amont", le vent souffle directement sur les pales de l'éolienne. Ce type de configuration requiert des pales rigides qui permettent de bien résister au vent car celles-ci sont plus exposées. La majorité des grandes éoliennes de grande puissance fonctionnent avec ce principe. Dans le fonctionnement des éoliennes à axe horizontal "aval", le vent souffle sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles.

La partie mécanique de l'éolienne, mise à part du rotor et des pales, est composée d'un système d'entraînement (figure 2.5).

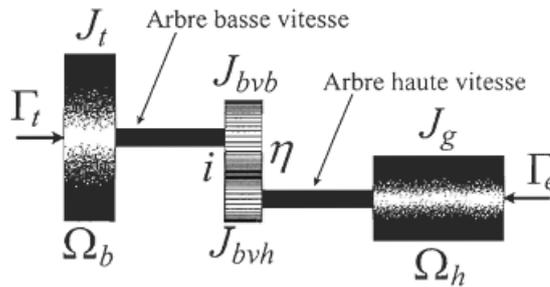


FIGURE 2.5 – Système d'entraînement mécanique

Ce système d'entraînement permet à l'énergie mécanique du rotor d'être transmise à la génératrice électrique. Le design de cet entraînement est propre à chaque éolienne. Il y a essentiellement deux types d'entraînement, soit les entraînements avec boîte de vitesse et les entraînements sans boîte de vitesse. La boîte de vitesse permet la diminution du couple et l'augmentation de la vitesse du côté de la génératrice électrique par rapport au côté du rotor de la turbine. La présence de cette boîte de vitesse sépare l'arbre de transmission de la turbine en deux, soit l'arbre à basse vitesse (côté moyeu) et l'arbre à haute vitesse (côté génératrice) (figure 2.6).

Les génératrices électriques utilisées dans le domaine de l'éolienne sont de différentes natures, on retrouve les machines synchrones conventionnelles et les machines synchrones à aimants permanents (MSAP), les machines asynchrones à cage d'écureuil (MAS) et les machines asynchrones à double alimentation (MADA) et les machines à courant continu qui sont peu utilisées en énergie éolienne car elles sont généralement coûteuses et leur maintenance est dispendieuse. Ces machines sont utilisées afin de transformer une énergie mécanique rotative en une énergie électrique et peuvent être connectées directement au réseau ou via un convertisseur de puissance.

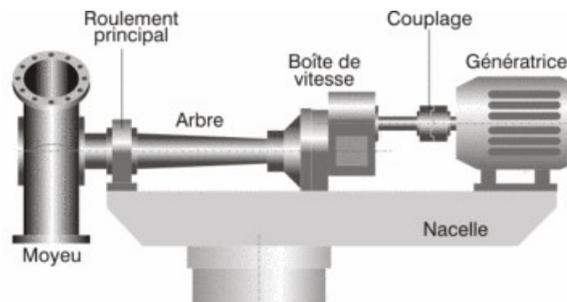


FIGURE 2.6 – Génératrice

On distingue aussi entre les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable. Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. La presque totalité des turbines éoliennes à vitesse fixe utilise la machine asynchrone à cage. Pour cette configuration, le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau, de plus cette configuration couple le rotor de l'éolienne au rotor de la machine asynchrone via une boîte de vitesse (figure 2.7).

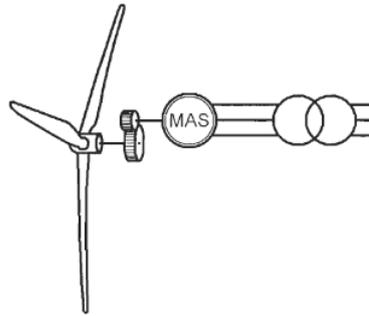


FIGURE 2.7 – Éolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone à cage

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Dans ce type d'éoliennes, l'utilisation de l'électronique de puissance est essentielle.

On peut classer les éoliennes à vitesse variable à l'intérieur de deux catégories, soit les éoliennes avec convertisseur pleine puissance ou les éoliennes avec convertisseur de puissance partiel.

La configuration la plus simple est celle présentant des éoliennes avec convertisseur pleine puissance où l'ensemble de la puissance électrique produite par la génératrice passe par le convertisseur de puissance. Typiquement, ce convertisseur de puissance est composé de deux convertisseurs dos à dos reliés par un lien à courant continu, l'un est appelé le convertisseur de puissance côté génératrice (redresseur) et l'autre le convertisseur de puissance côté réseau (onduleur) (figure 2.8).

Les génératrices utilisées pour ce type de configuration sont la machine asynchrone à cage, la machine synchrone avec un nombre élevé de pôles ou non et la machine synchrone à aimant permanent avec nombre élevé de pôles. Pour ce qui est des machines asynchrones à cage, le

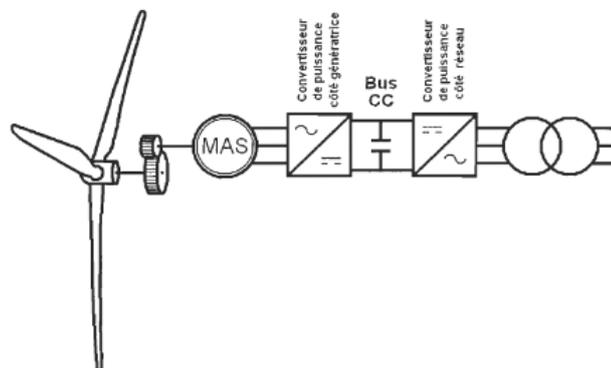


FIGURE 2.8 – Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un convertisseur pleine puissance

rotor de la machine est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse. Pour ce qui est des machines synchrones avec un nombre élevé de pôles, le rotor de la machine est directement couplé au rotor de la turbine, La génératrice peut posséder un circuit d'excitation externe ou être auto-excitée. Pour ce qui est des machines synchrones conventionnelles, elles doivent être composées d'une boîte de vitesse entre le rotor de la machine et le rotor de la turbine. Finalement, pour ce qui est des machines synchrones à aimants permanents, le rotor de la machine est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse ou non. Ceci dépend du nombre de paires de pôles de la machine. Cependant, le circuit d'excitation de la machine n'est plus nécessaire à cause de la magnétisation permanente de la génératrice.

Les éoliennes à vitesse variable avec convertisseur de puissance partiel (figure 2.9) sont composées de génératrices asynchrones à double alimentation (MASDA). Elle est la technologie la plus répandue pour les éoliennes de grande puissance. Le stator de la machine est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté via un convertisseur de puissance au réseau, une boîte de vitesse sert de couplage entre la vitesse du rotor de la turbine et le rotor de la machine asynchrone.

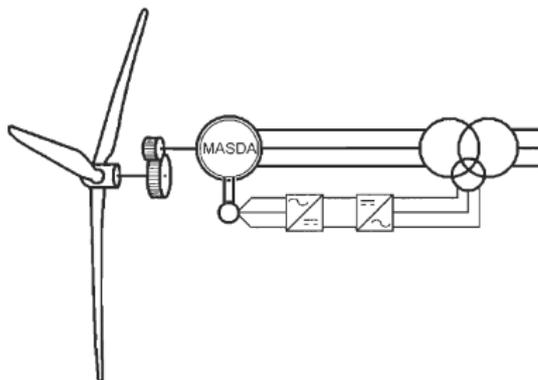


FIGURE 2.9 – Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation

2.2.2 Panneaux photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est un matériau électronique, composé de semi-conducteurs, capable de transformer une partie du rayonnement solaire reçu à sa surface en énergie électrique, grâce à un phénomène physique appelé effet photovoltaïque découvert par Antoine Becquerel en 1839, qui consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu. Le matériau semi-conducteur le plus utilisé est le silicium.

La couche supérieure de la cellule (figure 2.10) est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est à dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence que le silicium, par exemple le Phosphore P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons supérieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type N.

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence

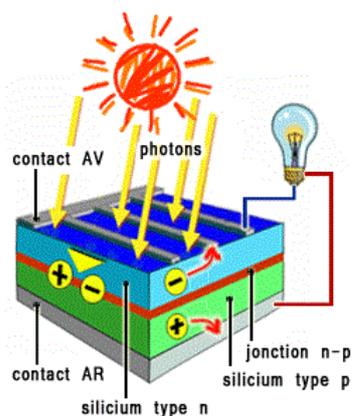


FIGURE 2.10 – Principe de fonctionnement d'une cellule "effet photovoltaïque"

inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore B. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons inférieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P. Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques. Quand il y a un apport d'énergie, sous forme de photons de lumière, des électrons de la couche N sont arrachés et viennent se placer dans la couche P, créant ainsi une modification de la répartition de la charge globale dans l'édifice. Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule.

On distingue trois principaux types de cellules solaires à base de silicium (figure 2.11) : les cellules en silicium monocristallin, les cellules en silicium polycristallin et les cellules en silicium amorphe [LV06], [PIG11]. Ces cellules à base de silicium sont actuellement les plus utilisées, quoique l'on retrouve dans le marché un autre type de cellules sans silicium en couche mince à base de cuivre-indium-sélénium (CIS) et il existe aussi d'autres types soit encore en phase de recherche/développement, soit trop chers et réservés à des usages où leur prix n'est pas un obstacle.

Technologie de cellule	Rendement actuel en laboratoire	Rendement actuel
m Si monocristallin	24,7 %	13 à 17 %
p Si polycristallin	19,8 %	9 à 15 %
a Si amorphe	13 %	4 à 9 %



FIGURE 2.11 – Différents types de cellule photovoltaïques à base de silicium

Les caractéristiques courant-tension I_{pv} V_{pv} et puissance-tension P_{pv} V_{pv} d'une cellule photovoltaïque pour une température et un niveau de rayonnement donnés sont montrés dans la figure 2.12, cette figure peut être décomposée suivant l'axe de la tension photovoltaïque V_{pv} en trois zones

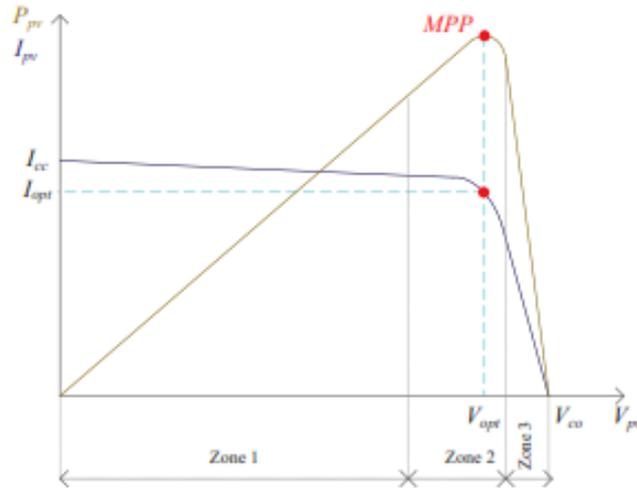


FIGURE 2.12 – Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un générateur PV pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés

- Zone 1 : Elle est assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnelle à l'irradiation. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.

- Zone 2 : Elle correspond au coude de cette caractéristique, le fonctionnement du générateur dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées.

Un point de puissance maximale "MPP" (maximum power point) peut être identifié au point $(I_{opt} V_{opt})$.

Par conséquent, ce point de fonctionnement permet d'exploiter au mieux le gisement solaire. Chaque cellule photovoltaïque est caractérisée par 4 paramètres majeurs : le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de puissance maximale $I_{MPP} I_{opt}$ et la tension de puissance maximale $V_{MPP} V_{opt}$.

- Zone 3 : Elle est assimilable à un générateur de tension V_{co} , le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées.

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclairagements. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant photovoltaïque et de la puissance produite (figure 2.13 (a) et (b)). L'accroissement du courant de court-circuit I_{cc} est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert V_{co} . Par ailleurs, une augmentation de la température à éclairage fixe, engendre une diminution de la tension de circuit ouvert ainsi qu'une légère augmentation de courant (figure 2.13 (c) et (d)) [Hou12] [Ach99], .

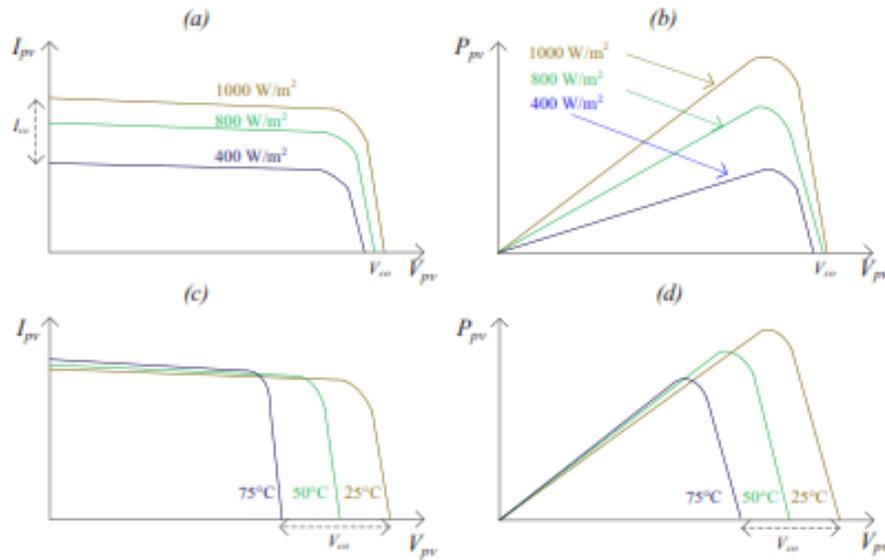


FIGURE 2.13 – Comportement des caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ sous l'influence de ; ((a) et (b)) : l'éclairement à température fixe, ((c) et (d)) : la température à éclairement fixe.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (0,5 V - 0,7 V) (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série pour augmenter la tension tandis que le courant du module photovoltaïque reste inchangé et égal au courant d'une cellule. Les premiers modules photovoltaïques comprenaient 36 cellules PV en série (0,5 V * 36 = 18 V), actuellement le nombre des cellules en série peut être supérieur, en générale de 48, 54, 60, 72, 96 (un module photovoltaïque standard est à 60 cellules soit 30 V). Les modules photovoltaïques sont eux-mêmes associés en série et/ou en parallèle pour former un champ photovoltaïque. La connexion en série des modules permet d'augmenter la tension, le courant reste inchangé, techniquement la borne + d'un panneau est connectée sur la borne - du panneau suivant (figure 2.14), tandis que la mise en parallèle permet d'augmenter le courant, la tension reste inchangée, techniquement toutes les bornes + sont reliées entre elles, et toutes les bornes - entre elles (figure 2.15). Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées. Un étage d'adaptation comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques (Hacheur, onduleur) est essentiel, le courant continu produit par le champ photovoltaïque est transformé en courant alternatif ou en courant continu adapté selon la nature du courant utilisé dans le bus électrique du réseau.

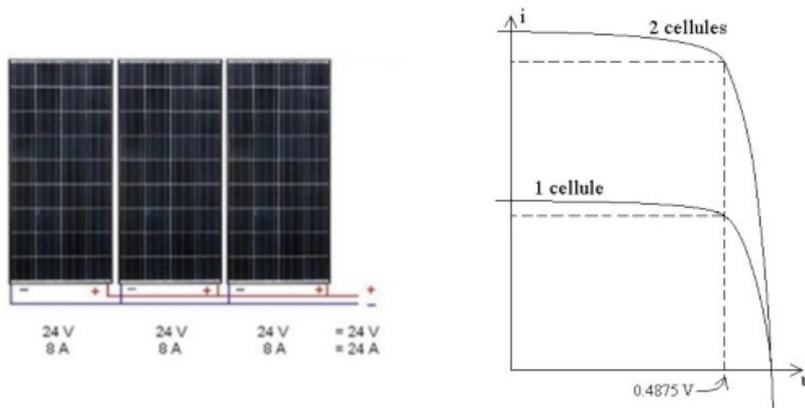


FIGURE 2.14 – Caractéristiques I(V) résultante de l'association de modules en parallèle

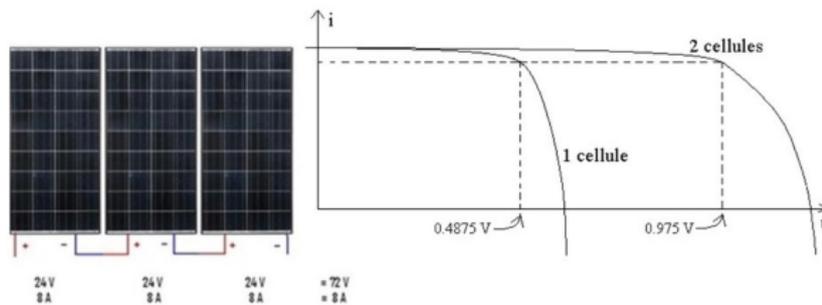


FIGURE 2.15 – Caractéristiques I(V) résultante de l'association de modules en série

2.2.3 Batteries

La batterie (ou accumulateur) est un système électrochimique réversible, qui stocke de l'énergie électrique sous forme chimique et la restitue sous forme électrique. Il existe plusieurs types de batteries : les batteries au plomb, les batteries au nickel et les batteries au lithium. Dans les installations de systèmes à énergies renouvelables, la batterie au plomb (figure 2.16) est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus couramment utilisée [Ach99].

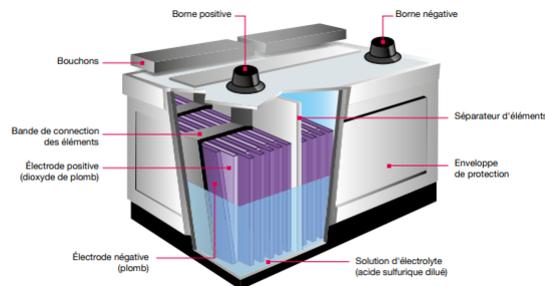


FIGURE 2.16 – Batterie au plomb

Une batterie au plomb se compose de deux électrodes positives et négatives. Ces deux élec-

trodes sont plongées dans une solution appelée électrolyte, qui produit la réaction chimique en permettant aux électrons et aux ions de passer d'une électrode à l'autre. Au milieu de la batterie, un séparateur isole les deux électrodes tout en permettant le passage des ions.

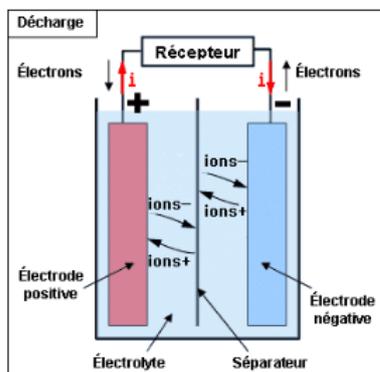


FIGURE 2.17 – Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb

Pendant la décharge (figure 2.17), la réaction électrochimique est naturelle, de sorte que les électrons traversent le récepteur pour rétablir l'équilibre des potentiels chimiques et ainsi générer le courant. Lorsque les deux électrodes ont le même potentiel, la batterie ne fournit plus de courant (la batterie est déchargée). Pendant la charge, la batterie reçoit du courant du générateur, qui circule dans le sens inverse. À l'intérieur de la batterie, les potentiels chimiques des électrodes s'éloignent et la tension augmente. L'énergie chimique accumulée se traduit par des réactions électrochimiques forcées, dans le sens opposé au sens naturel. A l'extérieur de la batterie, l'énergie électrique se traduit par un mouvement d'électrons.

On distingue les batteries ouvertes et étanches, les réactions dans les batteries ouvertes provoquent un dégagement de gaz et de chaleur et par sécurité et afin d'évacuer la surpression engendrée par la réaction, des soupapes sont disposées sur la face supérieure, en plus du fait que le liquide qui est à l'intérieur s'évapore peu à peu, il faut donc contrôler régulièrement son niveau et compléter si nécessaire. Les batteries étanches sont des batteries à recombinaison de gaz, qui permettent de reformer de l'eau à partir de la combinaison de dioxygène et de dihydrogène, elle n'ont pas besoin d'entretien.

La tension nominale aux bornes d'un élément primaire (deux plaques : électrode positive et électrode négative) dépend des couples de matériaux utilisés dans la batterie. Par exemple, aux bornes de batterie au plomb (couple plomb/oxyde de plomb), la tension théorique maximale est de 2 V. Les batteries de tensions standards plus élevées, typiquement 12, 24 voire 48 V sont obtenues par la mise en série de plusieurs éléments de base de 2 V. Par exemple afin d'obtenir une batterie de 12 V il faut empiler 6 éléments primaires de 2 V.

Ces batteries sont elles-mêmes associées en série et/ou en parallèle pour former un parc de batterie. La connexion en série des batteries permet d'augmenter la tension, la capacité reste inchangée, tandis que la mise en parallèle permet d'augmenter la capacité, la tension reste inchangée. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un parc de batteries aux caractéristiques souhaitées.

Une batterie est caractérisée par différents paramètres :

- Capacité nominale : s'exprime en Ampère heure (Ah). C'est la quantité de courant qui peut être extraite en décharge durant un intervalle de temps donné, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures. La capacité peut s'exprimer aussi en Watt heure (Wh), elle est encore appelée capacité énergétique et représente l'énergie que peut fournir la batterie pendant un intervalle de temps donné. Elle est fonction de la capacité en Ah et de la tension de fonctionnement de la batterie.

- Tension nominale : C'est la tension type de la batterie.

- Taux de recharge : C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en un temps donné (temps du taux de recharge). Supposons une batterie de 100 Ah et de taux de décharge C20 : le taux de recharge sera 100 Ah/20 h soit 5 A.

- Taux de décharge : C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie. Supposons une batterie de capacité de 100 Ah et de courant 5 A : le taux de décharge sera 100 Ah/5 A soit 20 heures ; il est noté C20.

- Profondeur de décharge (PDD en français et DOD en anglais) : C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut tirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie. Par exemple, si une batterie de 100 Ah (pleine capacité) voit sa capacité diminuer de 25 Ah, alors son taux de décharge (DOD, depth of discharge) est 25 % et son taux de charge (SOC, state of charge) est 75%.

- État de charge : C'est le pourcentage de la quantité d'énergie disponible dans la batterie à un instant t. Il est noté SOC. Sa valeur varie entre 0 pour une batterie totalement vide et 1 pour une batterie remplie. $SOC = 1 - DOD$

- Taux d'auto-décharge : L'auto décharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

- Rendement : Le rendement en quantité d'électricité est le rapport entre le nombre d'ampère heures fournis par un accumulateur et celui qu'il faut pour le remettre dans l'état initial. Ce rendement varie entre 0,70 et 0,95 suivant le type d'accumulateur. Le rendement en énergie est le rapport entre le nombre de watts heure restitués par la batterie et le nombre de watts heure qui lui sont fournis. Il est toujours inférieur au rendement en quantité d'électricité, la tension en décharge étant toujours inférieure à la tension en charge par suite des différentes polarisations intervenant dans l'accumulateur. Ce rendement varie entre 0,45 et 0,80.

- Nombre de jours d'autonomie : C'est la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter toute seule l'installation en courant, sans être rechargée ni endommagée.

- Température : La variation de température influence le rendement de la batterie. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 C. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une

légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie. Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie.

- Cycle et durée de vie : C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).

2.2.4 Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) est un dispositif qui retire de la chaleur présente dans un milieu et la transmet vers un autre milieu (figure 2.18). La chaleur se déplace de façon naturelle d'une zone chaude vers une zone froide alors que ce dispositif permet d'inverser le sens naturel du transfert spontané de l'énergie thermique en transférant de l'énergie thermique d'un milieu à basse température (source froide) vers un milieu à haute température (source chaude), permettant ainsi de chauffer en hiver par exemple un bâtiment déjà à 25 °C à partir de l'air extérieur à 0 °C, en effet tout corps, même « froid » contient une quantité importante d'énergie thermique qui peut être récupérée, ce transfert fait appel à un processus forcé, basé sur un fluide décrivant un cycle thermodynamique (cycle frigorifique). La pompe à chaleur peut être réversible permettant ainsi en plus du chauffage de refroidir en été par exemple un bâtiment à 25 °C à partir de l'air extérieur à 40 °C, en effet le cycle est inversé et la chaleur est retirée du bâtiment et rejetée à l'extérieur.

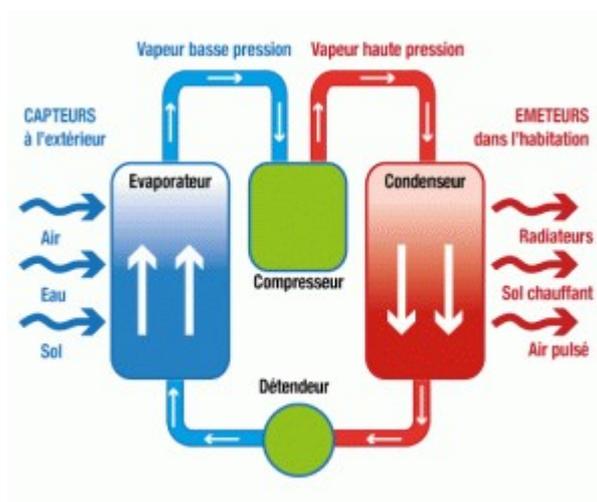


FIGURE 2.18 – Pompe à chaleur

Les pompes à chaleur peuvent être classées selon leur source d'énergie (sol, eau ou air) et leur système d'échange (eau ou air). Les types les plus couramment rencontrés sont :

- Pompe à chaleur sol-eau : Ces pompes à chaleur utilisent l'énergie géothermique et tirent leur énergie d'un réseau de collecte vertical ou horizontal. Le réseau de collecte verticale est

constitué de sondes qui sont insérées verticalement dans le sol. Le réseau de collecte horizontal est enterré horizontalement à une profondeur d'au moins 1 mètre. Ce type de réseau nécessite une surface relativement importante.

- Pompe à chaleur eau-eau : Ces pompes à chaleur utilisent l'eau souterraine comme source de chaleur. L'eau souterraine, dont la température est relativement stable grâce à l'énergie géothermique, est pompée directement dans l'évaporateur de la pompe à chaleur, où elle transfère sa température au système de chauffage. Une pompe à chaleur eau-eau utilise une pompe d'aspiration pour pomper l'eau souterraine du sol et un puits de drainage pour renvoyer l'eau utilisée dans le sol.

- Pompe à chaleur air-eau : Ces pompes à chaleur extraient la chaleur de l'air et la transfèrent à l'eau du système de chauffage. Ces pompes à chaleur ne nécessitent pas un réseau de collecte très étendu, car le fluide frigorigène dans l'évaporateur est en contact direct avec l'air. De ce fait, leurs coûts d'installation sont relativement faibles.

- Pompe à chaleur air-air : Ce type de pompe à chaleur fonctionne selon le même principe que les pompes à chaleur air-eau. La différence est que la chaleur extraite est soufflée dans les pièces à chauffer sous forme d'air chaud.

Le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur est le même que celui de la machine frigorifique figure 2.19, mais l'application travaille en sens inverse. Dans une machine frigorifique tout est basé sur la propriété des fluides frigorigènes de s'évaporer et de se condenser à des températures différentes en fonction de la pression (R 22 est le fluide le plus couramment utilisé en climatisation). Ce fluide passe dans le circuit frigorifique par 4 éléments essentiels :

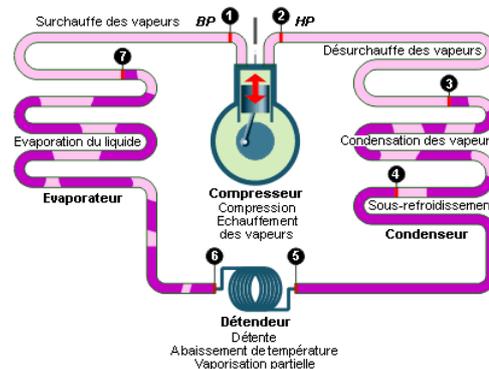


FIGURE 2.19 – Machine frigorifique

- Evaporateur : Dans l'évaporateur, le fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur.

- Compresseur : Le compresseur va tout d'abord aspirer le gaz frigorigène à basse pression et à basse température. L'énergie mécanique apportée par le compresseur va permettre d'élever la pression et la température du gaz frigorigène.

- Condenseur : Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur au fluide extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent (« désurchauffe »), avant l'apparition de la première goutte de liquide. Puis la condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur. Le fluide liquide peut alors se refroidir de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur.

- Détendeur : La différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur nécessite d'insérer un dispositif « abaisseur de pression » dans le circuit. C'est le rôle du détendeur. Le fluide frigorigène se vaporise partiellement dans le détendeur pour abaisser sa température.

Le cycle est fermé, le fluide frigorigène circule sous l'action du compresseur dans les quatre éléments constituant la machine frigorifique.

La pompe à chaleur s'inscrit dans la démarche développement durable, du fait qu'elle est caractérisée par un coefficient de performance COP (Coefficient of Performance) équivalent à un rendement théorique, mais le COP est toujours supérieur à 1, généralement de 1,5 à 4,5. Ce coefficient indique le rapport de l'énergie produite par rapport à l'énergie consommée. Un COP de 4 signifie que pour 1 kWh d'énergie électrique consommée pour faire essentiellement tourner le compresseur, on produit 4 kWh d'énergie thermique, 75% de l'énergie thermique est donc gratuite. Afin de pouvoir comparer le COP de plusieurs pompes à chaleur, celui-ci doit naturellement être calculé dans les mêmes conditions (température source, température d'échange...).

2.2.5 Système hybride de production d'énergie électrique

Un système hybride est un système dans lequel plusieurs sources d'énergie différentes sont jumelées afin de fournir l'énergie nécessaire à une charge. Un système hybride type comporte un champ photovoltaïque associé à une éolienne et un groupe électrogène qui peut intervenir en secours. Ce système comporte en plus des éléments de stockage afin d'adapter la production à la demande [MBCC08], il existe principalement deux types de système hybride, les systèmes avec un bus à courant continu (figure 2.20) et les systèmes avec un bus à courant alternatif (figure 2.21). Dans ce rapport on étudiera un système hybride avec un bus à courant alternatif, une autre étude sur un système hybride avec un bus à courant continu est détaillée dans [BOS17].

Un système hybride peut être autonome (non connecté au réseau) ou raccordé au réseau. Les systèmes autonomes sont conçus pour répondre aux besoins de consommation d'un site isolé du réseau électrique. Les systèmes couplés au réseau injectent l'énergie issue des sources sur le réseau de distribution. On distingue deux types d'installations couplés au réseau :

- Injection de la totalité de la production : l'énergie produite par les sources est directement injectée sur le réseau électrique.
- Injection du surplus de production : l'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.

Dans un système hybride, il y en a des sources de différentes natures, par exemple, les

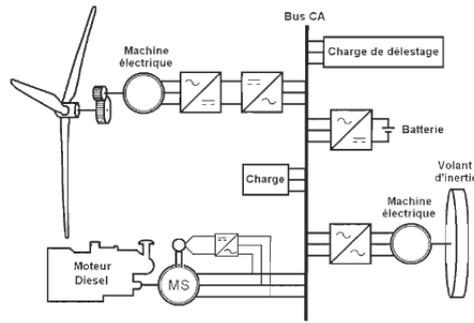


FIGURE 2.20 – Exemple de système hybride avec bus à courant alternatif

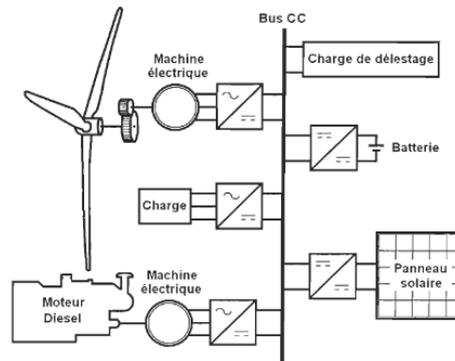


FIGURE 2.21 – Exemple de système hybride avec bus à courant continu

éoliennes sont en AC avec un amplitude et une fréquence variable, les panneaux PV sont en DC avec une tension variable, la batterie est aussi en DC mais avec une tension quasi-fixe, les récepteurs (Charges) peuvent être en DC ou AC et la connexion avec le réseau est en AC avec une fréquence fixe de 50Hz. La connexion entre ces équipements nécessite des convertisseurs adéquats pour passer d'une forme à une autre.

Dans le passé, ces conversions ont été réalisées à l'aide des machines électriques couplées mécaniquement (convertisseurs électromécaniques) qui sont volumineuses et peu flexibles. Aujourd'hui, les convertisseurs statiques ont remplacé une bonne partie des convertisseurs électromécaniques, et cela grâce aux avancements dans le domaine de l'électronique de puissance avec les diodes, les transistors, thyristors etc... Ces composants à base de semi-conducteurs permettent de faire la conversion d'énergie efficacement, de réduire le volume et le poids du convertisseur, ainsi que de contrôler la tension et le courant avec précision et un coût de moins en moins cher. C'est l'ère des convertisseurs statiques.

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. On distingue 4 familles de convertisseurs statiques, figure 2.22 :

Dans le contexte du micro-réseau, il existe souvent la conversion bidirectionnelle DC/DC et DC/AC, soit le hacheur bidirectionnel et l'onduleur bidirectionnel. Parmi les nombreuses struc-

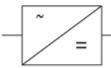
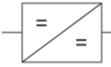
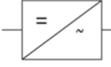
Réseau	Symbole du convertisseur	Charge	Nom du convertisseur
Alternatif		Continu	REDRESSEUR
Continu		Continu	HACHEUR
Continu		Alternatif	ONDULEUR
Alternatif		Alternatif	GRADATEUR

FIGURE 2.22 – Différents type de convertisseur statique de puissance

tures existantes de convertisseur statique, les plus pertinentes structures adaptées au contexte du micro-réseau sont : Le convertisseur DC/DC et le convertisseur DC/AC.

2.3 Système étudié

2.3.1 Micro-réseau :

Un micro-réseau type à énergie renouvelable qui peut être intégré dans un bâtiment est montré à la figure 2.23 ; ce système a été effectivement installé à l'École Marocaine des Sciences de l'Ingénieur et fera l'objet d'étude dans la suite du rapport.

Le système de la figure 2.23 se compose des éléments suivants :

- Une éolienne à axe vertical, la génératrice alimente un régulateur dont la fonction de base est le redressement c'est-à-dire la transformation de la tension alternative en une tension continue (convertisseur AC/DC), mais qui peut aussi orienter la puissance vers une résistance de délestage pour arrêter l'éolienne. La tension continue à la sortie du régulateur passe par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui la transforme en tension alternative 220 V avec une fréquence 50 Hz. La puissance de cette éolienne est 3 KW.

- Une éolienne à axe horizontale dont l'ensemble des équipements est intégré dans la nacelle et dont la puissance est égale à 3 KW.

- Six panneaux monocristallins en série, connectés à un onduleur qui transforme la tension continue produite en tension alternative. La puissance de chaque panneau est 250 W.

- Six panneaux polycristallins en série connectés à un onduleur. La puissance de chaque panneau est 250 W.

La puissance totale installée est 9 KW crête.

- Un onduleur chargeur qui fournit le bus AC auquel les sous systèmes de productions (éoliennes et panneaux photovoltaïques) sont connectés.

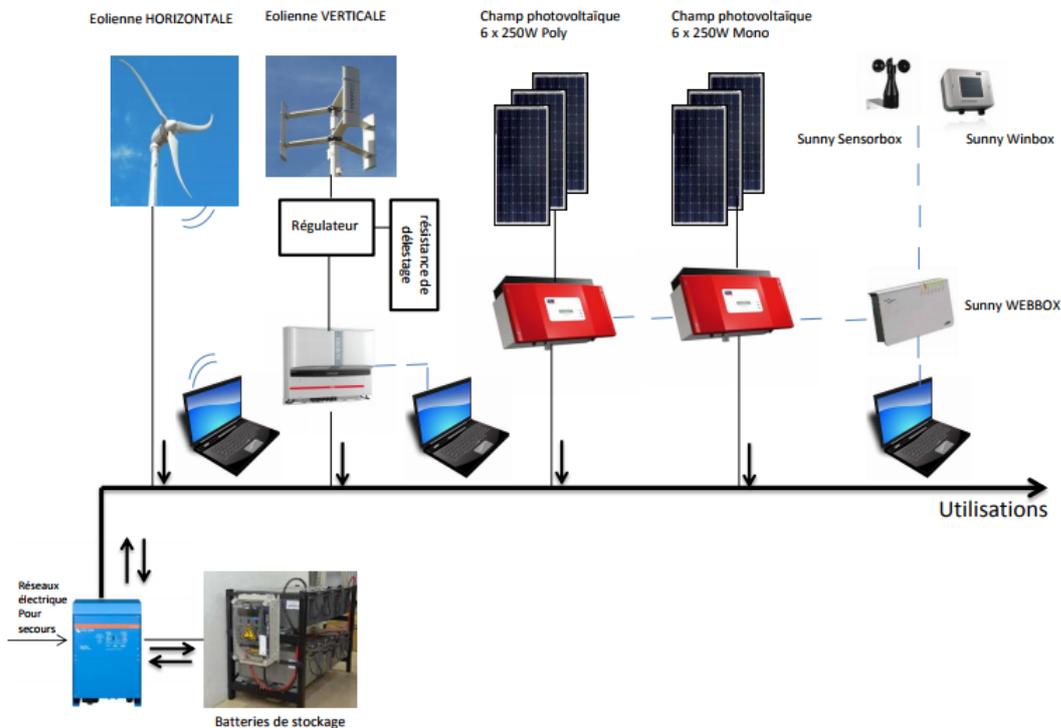


FIGURE 2.23 – Système de production/stockage

- Un banc de batteries qui permet le stockage d'énergie pour une utilisation ultérieure. Le banc de batteries est composé de quatre batteries en série qui sont mis en parallèle avec quatre autres batteries en série. Chaque batterie a une capacité de 220 Ah et une tension de 12 V. L'énergie totale qui peut être stockée dans les batteries est 21120 Wh. Les batteries sont connectées à l'onduleur chargeur.

Le réseau électrique public est connecté à l'onduleur chargeur.

La plateforme contient aussi un ensemble d'équipements de monitoring :

- Un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent en m/s.
- Un solarimètre pour mesurer l'irradiation solaire en W/m^2 incidente sur le plan des panneaux.
- Un capteur de température qui mesure la température des cellules photovoltaïque en °C.

De plus, les données entrées/sorties (courant, tension, puissance, état de charge des batteries) sont récupérées et enregistrées sous format excel avec une période d'échantillonnage au choix.

L'onduleur chargeur est le maître de l'installation, il la gère selon le fonctionnement suivant :

- Si la production est égale à la consommation : il ne fait rien de particulier.

- Si la production est inférieure à la consommation : il prend le besoin nécessaire des batteries et le rajoute sur le réseau. Mais si les batteries sont déchargées, l'onduleur chargeur bascule vers la deuxième entrée qui est celle du réseau public pour compléter le besoin. Une autre entrée est disponible dans l'onduleur chargeur (elle n'a pas été utilisée) qui peut être connecté à un groupe électrogène, et c'est l'onduleur chargeur qui va assurer son démarrage en cas de besoin.

- Si la production est supérieure à la consommation : il prend le surplus et l'utilise pour charger les batteries. Mais si les batteries sont complètement chargées, l'onduleur oriente le flux disponible vers le réseau public.

2.3.2 Chauffage du bâtiment :

Le bâtiment à usage résidentiel étudié présente une superficie de 96 m² et une hauteur de 2,5 m. Le bilan thermique permettant de déterminer la puissance de chauffage nécessaire est donné par :

$$P = V \times C \times \Delta T \quad (2.1)$$

Où :

V : volume du bâtiment en m³

C : coefficient de construction = 0,75 si le bâtiment est très bien isolé, 1,1 si le bâtiment est bien isolé, 1,3 si le bâtiment est mal isolé et 1,6 si le bâtiment est très mal isolé (selon RT2005)
 ΔT = différence entre la température intérieure souhaitée et la température extérieure de base.

La puissance de chauffage nécessaire pour le bâtiment étudié considéré bien isolé, et dont on souhaite une température intérieure de 21°C sachant que la température extérieure de base est -10°C calibrée à 8 KW.

Le système de chauffage typique basé sur la pompe à chaleur dans un bâtiment multizone est représenté par la figure 2.24

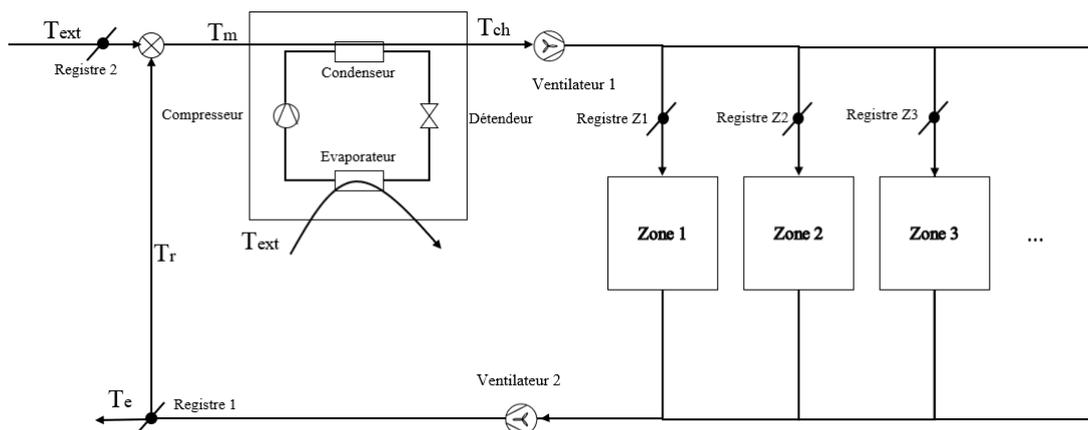


FIGURE 2.24 – Système de chauffage

Les registres permettent de contrôler les débits d'air utilisés dans le système :

- le registre 1, contrôle la fraction de l'air retourné qui sera recyclé et mélangé à de l'air frais.

Le reste de cet air sera rejeté.

- le registre 2 contrôle le débit d'air extérieur introduit et par conséquent le débit d'air total utilisé dans le système, ce registre ne doit pas être fermé pour assurer un minimum de changement d'air exigé par la réglementation sanitaire des bâtiments, ce débit d'air extérieur est mélangé avec l'air de retour.

Ensuite la pompe à chaleur extrait de la chaleur de l'air extérieur au niveau de l'évaporateur, et la transfère à l'air mélangé pour le chauffer au niveau du condenseur avant d'être renvoyé au bâtiment ; le principe de fonctionnement de ce transfert de chaleur est expliqué dans le chapitre précédent. Les ventilateurs 1 et 2 assurent la circulation de l'air et maintiennent une pression constante dans les canalisations. Dans le bâtiment, à l'entrée de chaque zone, il y a un registre pour contrôler le débit d'air qui sera soufflé dans la zone.

2.4 Simulation TRNSYS et problématiques

La simulation est un élément crucial lors de l'analyse d'un système, car elle fournit les informations nécessaires à la maîtrise de son fonctionnement lorsqu'il est soumis à différentes conditions internes ou externes.

L'implémentation de ces conditions dans le système réel peut être coûteuse en termes de temps et d'investissement économique, voire même impossible. Le logiciel TRNSYS a été conçu afin de simuler les performances en régime transitoire des systèmes énergétiques [KBM04] ; il utilise une approche modulaire ; le système est décrit par un ensemble de composants appelés "types", ces composants sont regroupés dans des bibliothèques selon leurs rôles, l'utilisateur choisit les composants qui constituent le système, les configure et détermine les connexions entre les entrées et les sorties. Du fait que chaque composant est décrit par un programme en Fortran, un utilisateur peut modifier un composant ou en créer un nouveau afin de modéliser n'importe quelle nouvelle technologie.

L'interface TRNBUILD est consacrée à la description du bâtiment. La "SIMULATION STUDIO" est une interface graphique pour effectuer des simulations et manipuler les résultats.

Le logiciel METEONORM permet de disposer pour TRNSYS, d'une base mondiale de données météorologiques fiables durant une année pour un site.

Pour effectuer une bonne simulation sur TRNSYS, il est indispensable d'avoir une connaissance approfondie du système réel, plus d'autres renseignements qui doivent être parfaitement connus.

2.4.1 Micro-réseau :

Dans la figure 2.25, on reprend le micro-réseau sur TRNSYS avec une légère modification qui n'affecte pas le fonctionnement où on considère une seule chaîne photovoltaïque et l'éolienne à axe horizontal. Les résultats de simulations sont montrés sur la figure 2.26.

Pour ce micro-réseau, le régulateur agit selon la production, la demande et l'état de charge des batteries instantanés en utilisant l'algorithme heuristique expliqué dans la section précédente, et ne prend pas en considération les prévisions météorologiques pour la production, ni la demande future de la charge qui est généralement estimée.

L'objectif sera d'assurer que les batteries soient chargées quand il y a moins de production afin de satisfaire la demande sans avoir recours au réseau public.

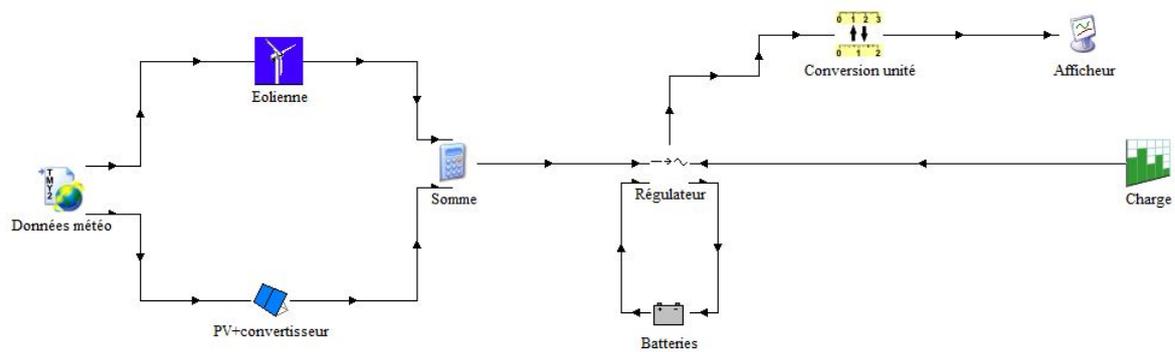


FIGURE 2.25 – Système de production/stockage sur Trnsys

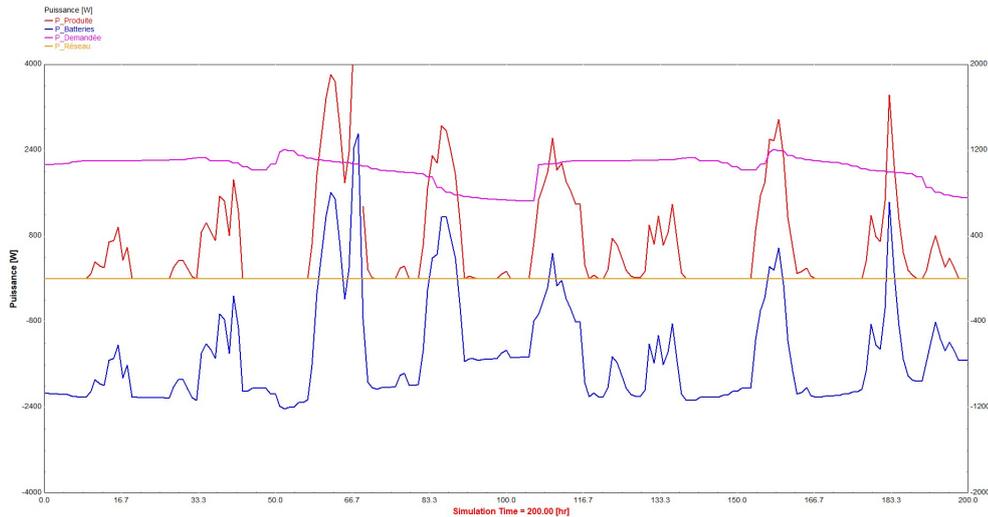


FIGURE 2.26 – Résultat de simulation du système production/stockage sur Trnsys

Aussi il faut assurer que les batteries ne soient pas complètement chargées pour pouvoir recevoir de la puissance quand il y a excès de production, ceci en minimisant le nombre de cycle charge/décharge des batteries pour leur assurer une longue durée de vie.

2.4.2 Chauffage du bâtiment :

la figure 2.27 représente le système de chauffage, et les résultats de simulation sont montrés sur les figures 2.28 et 2.29. Les régulateurs classiques de la température des bâtiments (thermostats, PID) agissent simplement en fonction de l'erreur entre la température consigne et la température mesurée du bâtiment, les prévisions météorologiques (température, rayonnement solaire) qui affectent la température du bâtiment ne sont pas mises en profit ainsi que le profil

d'occupation, par conséquent la commande n'est pas forcément optimale et le maintien de la température à sa valeur de consigne n'est pas garant.

L'objectif sera donc de déterminer la séquence de commande optimale en fonction des prédictions des données météorologiques et de l'occupation pour assurer le maximum de confort aux occupants mais avec un minimum de consommation d'énergie.

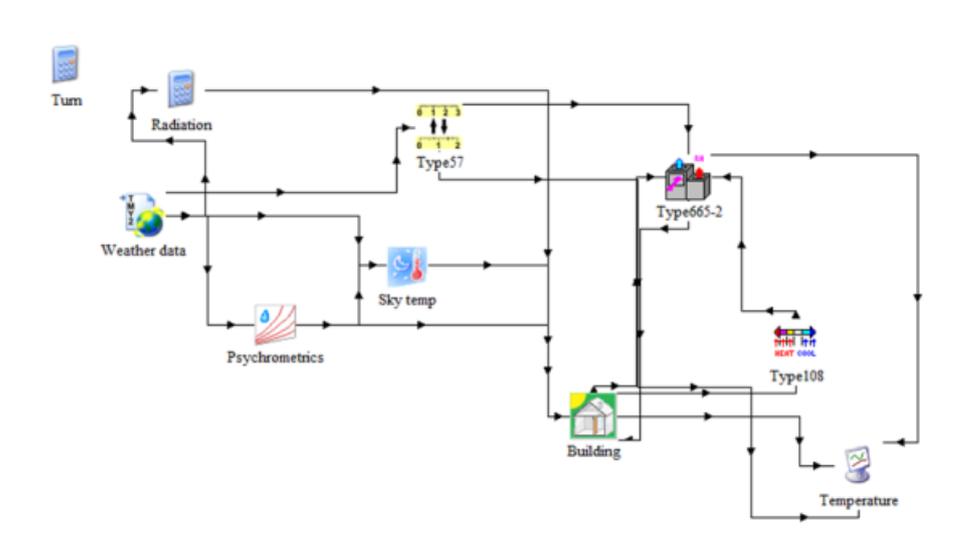


FIGURE 2.27 – Système de chauffage sur Trnsys

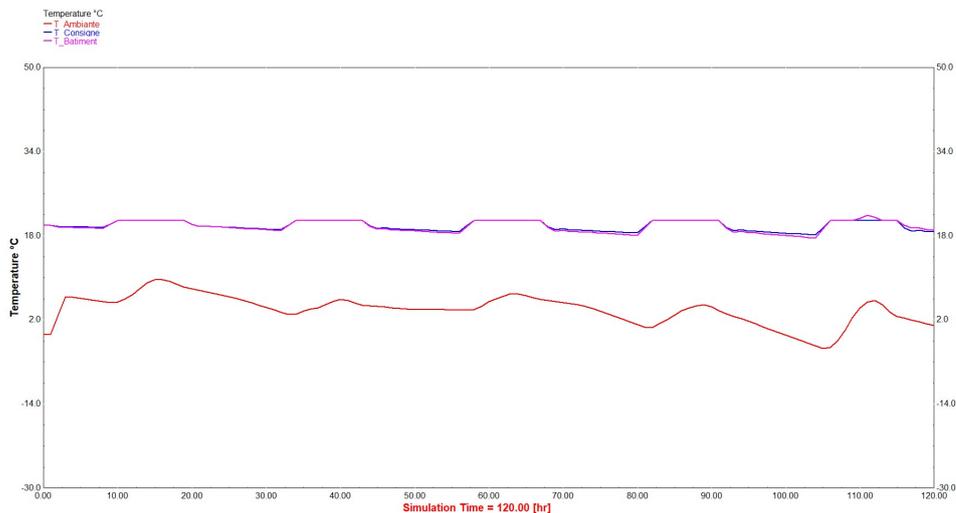


FIGURE 2.28 – Résultats de simulation du système de chauffage sur Trnsys

Dans la suite du rapport, les simulations sur TRNSYS de chaque équipement nous permettront de disposer de suffisamment de données dans différentes conditions de fonctionnement pour

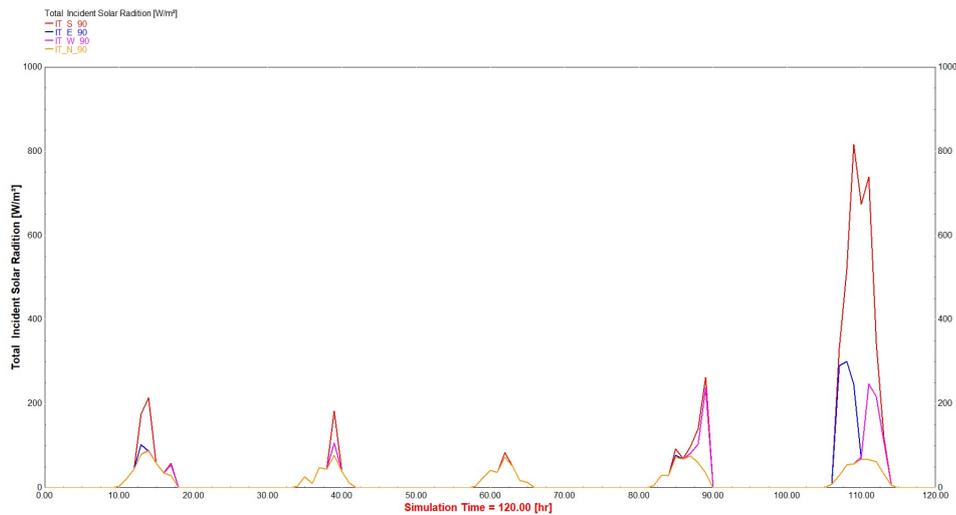


FIGURE 2.29 – Rayonnement solaire reçu par le bâtiment

la modélisation et identification des équipements constituant le système étudié.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système type à énergie renouvelable qui peut être intégré dans un bâtiment pour réduire sa consommation énergétique voire être en surplus de production d'énergie. La simulation de ce système a permis d'identifier les points à prendre en considération pour améliorer ses performances et d'en profiter au maximum.

L'élaboration d'une stratégie de commande optimale qui pourrait considérer ses points est essentielle et possible. Plusieurs stratégies de commandes utilisées sont à base de modèle.

D'où la nécessité de développer un modèle global du système étudié qui sera constitué des modèles de ses équipements. Ceci est l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre 3

Modélisation et Identification

Contents

3.1	Introduction	32
3.2	Éolienne	32
3.3	Panneaux photovoltaïques	36
3.4	Batteries	38
3.5	Interaction avec le réseau public	40
3.6	Pompe à chaleur	41
3.7	Bâtiment	42
3.7.1	Modèle Monozone	44
3.7.2	Modèle Multi-zones	48
3.8	Données Météorologiques	54
3.8.1	Vitesse du vent	54
3.8.2	Température	55
3.8.3	Rayonnement solaire	55
3.9	Conclusion	59

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux modèles mathématiques, qui représentent les relations entre les entrées et les sorties de chaque sous-système. Dans la littérature on distingue trois sortes de modèles en fonction des informations mises en jeu pour leur conception :

- *Les modèles "boîte blanche"* : ou modèles de connaissance qui sont construits à partir des équations physiques régissent les phénomènes intervenant au sein du processus étudié. Ces modèles ne comportent généralement pas de paramètres ajustables. Dans la pratique, il est toujours souhaitable d'établir un modèle de connaissance des processus que l'on étudie. Néanmoins, il arrive fréquemment que le processus soit trop complexe, ou que les phénomènes qui le régissent soient trop mal connus, pour qu'il soit possible d'établir un modèle de connaissance suffisamment précis pour l'application considérée. On est alors amené à concevoir des modèles purement empiriques, fondés exclusivement sur les résultats de mesures effectuées sur le processus.

- *Les modèles "boîte noire"* : Ces modèles sont construits essentiellement sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du processus à modéliser. La modélisation consiste alors à utiliser, pour représenter les relations entre les entrées et les sorties, des équations (algébriques, différentielles, ou récurrentes) paramétrées, et à estimer les paramètres, à partir des mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision possible avec le plus petit nombre possible de paramètres ajustables.

- *Les modèles "boîte grise"* : lorsque des connaissances, exprimables sous forme d'équations, sont disponibles, mais insuffisantes pour concevoir un modèle de connaissance satisfaisant, on peut avoir recours à une modélisation "boîte grise" (ou modélisation semi-physique) qui prend en considération à la fois les connaissances et les mesures. Une telle démarche peut concilier les avantages de l'intelligibilité d'un modèle de connaissance avec la souplesse d'un modèle comportant des paramètres ajustables.

Dans ce rapport, l'approche boîte blanche sera utilisée pour développer des modèles physiques pour le bâtiment, la pompe à chaleur et les batteries. L'approche boîte grise sera utilisée pour développer les modèles de l'éolienne et les panneaux photovoltaïques où la structure du modèle est donnée à partir des équations physiques mais les paramètres du modèle sont identifiés à l'aide de mesures. L'ensemble de ces modèles sont dits **modèles de simulation** ; ils sont utilisés de manière indépendante des processus qu'ils représentent. En revanche dans la dernière partie où l'on sera amené à développer des modèles pour les données météorologiques notamment la température ambiante, la vitesse du vent et le rayonnement solaire, les modèles recherchés sont dits **modèles de prédiction**. Ces modèles sont introduits dans [JS17].

3.2 Éolienne

La modélisation de l'éolienne doit comprendre l'ensemble des éléments constituant la chaîne de conversion, notamment un modèle aérodynamique de l'éolienne, un modèle de l'entraînement mécanique, un modèle de la génératrice et un modèle du convertisseur de puissance [MBCC08].

Le modèle global fournit à la sortie la valeur de la puissance électrique produite à partir de la vitesse du vent reçue en entrée. Ce modèle dynamique permet de mettre en oeuvre des stratégies de commande pour contrôler la production de l'éolienne et aussi pour estimer sa courbe de puissance.

La courbe de puissance d'une éolienne est un graphe qui représente la puissance de sortie en fonction de la vitesse de vent comme illustré sur la figure 3.1. Elle est estimée théoriquement et validée expérimentalement à partir de mesures effectuées sur site, dans la pratique, on prend la moyenne des différentes mesures pour chaque vitesse de vent afin de tracer le graphe. Il est à noter qu'une erreur de mesure de 3% de la vitesse du vent engendrera une erreur de 9% du contenu énergétique du vent. Par conséquent, une marge d'erreur de +/-10% est possible, même dans les courbes de puissance certifiées. On peut distinguer 4 parties sur cette courbe : de 0 à la vitesse minimale de démarrage V_{min} , de la vitesse de démarrage vitesse nominale V_{nom} , de la vitesse nominale à la vitesse maximale V_{max} et au dessus de la vitesse maximale.

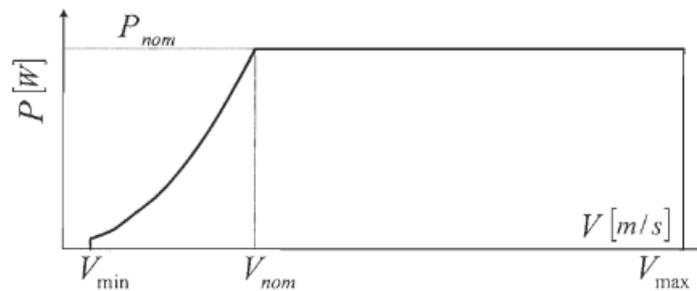


FIGURE 3.1 – Courbe de puissance idéale

- De 0 à la vitesse minimale de démarrage V_{min} : la puissance de sortie est nulle, le vent n'est pas suffisamment important pour entraîner la rotation du rotor.
- De la vitesse de démarrage à la vitesse nominale V_{nom} : la puissance de sortie augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale P_{nom} . Dans cette zone la puissance produite par l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

La puissance disponible dans le vent P_V pour une quantité d'air de masse volumique ρ qui circule avec une vitesse V_V et qui traverse la section de la turbine éolienne A balayée par le rotor (figure 3.2) est :

$$P_V = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (3.1)$$

Une partie seulement de cette puissance est captée par la turbine éolienne. Le taux de puissance récupérée est caractérisé par un coefficient aérodynamique ou coefficient de puissance C_P défini comme suit :

$$C_P = \frac{P_t}{P_V} \quad (3.2)$$

P_t est la puissance captée par la turbine éolienne. Le coefficient C_P est une grandeur variable

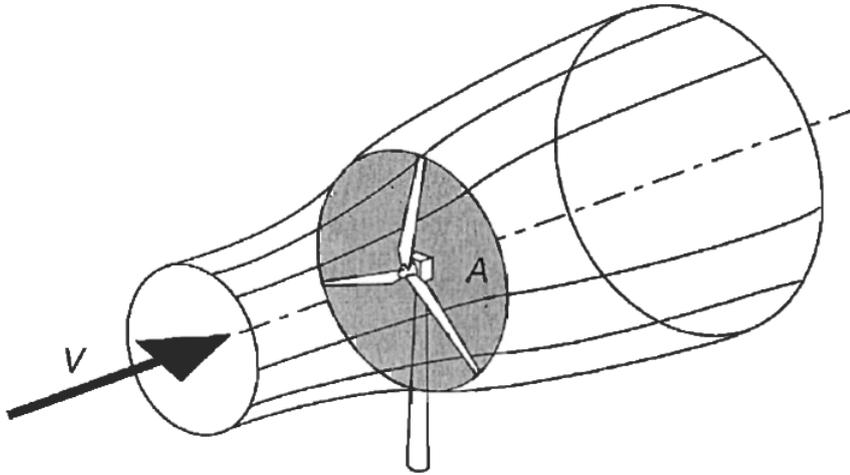


FIGURE 3.2 – Captage de l'énergie cinétique du vent

en fonction du coefficient de la vitesse réduite λ défini comme étant le rapport de la vitesse tangentielle au bout des pales et la vitesse instantanée du vent V , et de l'angle de calage des pales β qui est l'angle formé par la pale et le plan de rotation de la pale. La valeur maximale théorique possible de C_P est de $\frac{16}{27} = 0,5926$, qui s'appelle limite de Betz.

La puissance capturée par la turbine éolienne est fonction de la vitesse du vent, la vitesse réduite, l'angle de calage des pales, la densité de l'air et la surface balayée par le rotor. Elle s'exprime selon l'équation :

$$P_t = \frac{1}{2} C_P(\lambda, \beta) \rho A V^3 \quad (3.3)$$

- De la vitesse nominale à la vitesse maximale d'arrêt V_{max} : la puissance de sortie est maintenue à la puissance nominale de l'éolienne qui correspond à la puissance nominale de sa génératrice presque constante grâce à un dispositif de régulation.
- Au dessus de la vitesse maximale V_{max} : l'éolienne est mise à l'arrêt pour protection, la puissance de sortie est nulle

La limitation de la puissance d'une éolienne lorsque la puissance nominale de la génératrice est atteinte peut se faire par un calage fixe des pales (éolienne pas fixe). Dans ce cas, les pales sont construites pour se déformer, d'après des phénomènes aéroélastiques, de telle sorte qu'à partir d'une certaine puissance, elles diminuent l'efficacité aérodynamique de la turbine. C'est ce que l'on appelle le décrochage aérodynamique passif (Passive Stall Control). Par ailleurs, il est également possible d'utiliser un calage variable des pales (éolienne pas variable). Dans ce cas, la direction du vent vue par chaque pale est modifiée à l'aide d'un mécanisme électromécanique situé entre le moyeu et chaque pale. Cette technique est très utilisée à l'intérieur des éoliennes modernes. Le calage variable des pales (Pitch to Feather Control) est la méthode modifiant positivement l'angle de calage. Le fait de modifier l'angle de calage des pales négativement

défini le décrochage aérodynamique actif (Active Stall Control).

La courbe de puissance de l'éolienne à axe horizontal peut être représentée par le modèle suivant :

$$P_{wt} = \begin{cases} 0, & V < V_{min} \\ 0.2139V^3 + 31.5V^2 - 31.83V + 50, & V_{min} < V < V_{nom} \\ 3000, & V_{nom} < V < V_{max} \\ 0, & V_{max} < V \end{cases} \quad (3.4)$$

Ce modèle calcule la puissance électrique P_{wt} (Watt) produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent V (m/s). Ces paramètres sont estimés en utilisant la méthode des moindres carrés.

La figure 3.3 représente la puissance produite en fonction de la vitesse du vent à partir des données obtenues par simulation sur TRNSYS.

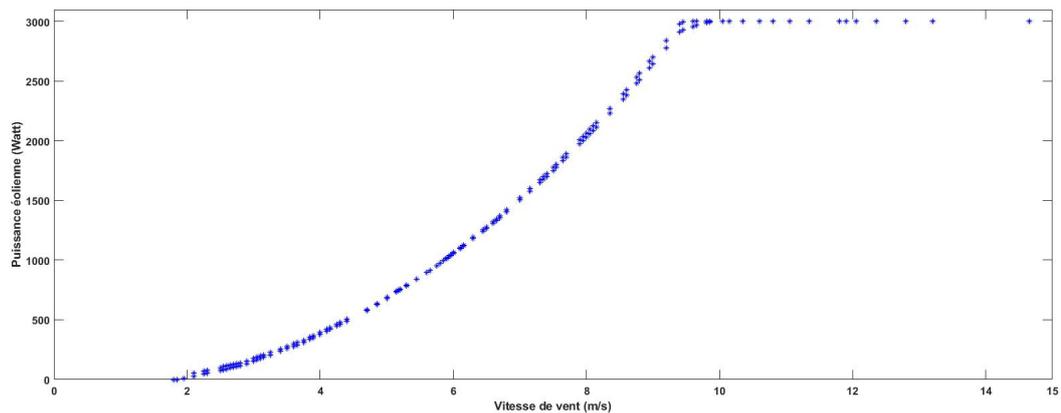


FIGURE 3.3 – Puissance produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent

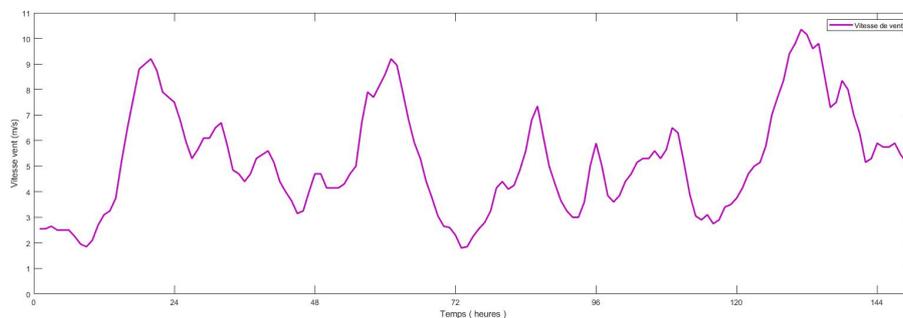


FIGURE 3.4 – Vitesse du Vent

Pour valider le modèle, une simulation de l'éolienne physique est réalisée sur TRNSYS et une autre sur Matlab avec le modèle décrit par l'équation (3.4). La figure 3.4 représente la vitesse

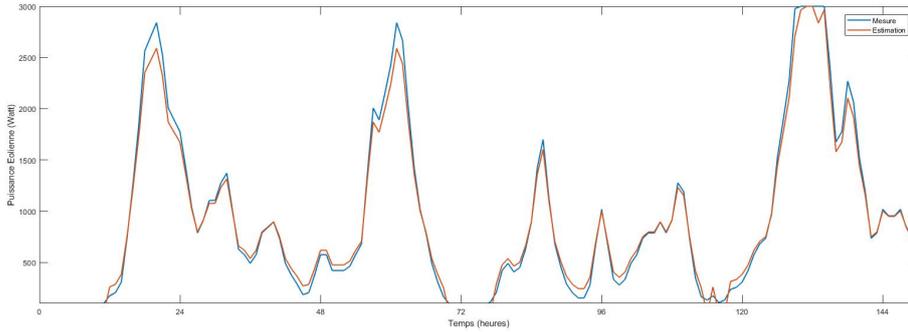


FIGURE 3.5 – Puissance produite par l'éolienne

du vent en (m/s) appliquée à l'entrée des deux modèles et la figure 3.5 représente la puissance produite en (Watt). Le modèle (3.4) permet d'estimer directement la puissance produite aussi bien qu'un modèle physique plus complexe intégrant toutes les parties dynamiques de l'éolienne.

3.3 Panneaux photovoltaïques

La puissance générée par la chaîne photo-voltaïque dépend de plusieurs paramètres, notamment des conditions météorologiques (irradiation solaire, température, humidité) auxquelles sont soumis le panneau ainsi que le type de matériaux utilisé.

La littérature propose de nombreux travaux traitant de la modélisation électrique d'une cellule PV : modèle idéal, modèle 1-diode, modèle 2-diodes, modèle Bishop's ou encore le modèle dynamique. Chacun d'entre eux aboutissant à une expression du courant I_{cell} produit par la cellule photovoltaïque plus ou moins complexe et précis. Le tableau 3.1 résume ces différents types de modèles de cellule. Un panneau photovoltaïque est composé de N_s cellules en série et N_p en parallèle, par conséquent, Ce courant I_{cell} est modifié pour calculer le courant totale I_{pv} .

Ce courant continu produit par le champ photovoltaïque est transformé en courant alternatif utilisé dans le bus électrique AC du réseau. Le modèle de cet étage d'adaptation doit être aussi développé est associé au modèle PV pour obtenir un modèle globale de la chaîne photovoltaïque.

Toutefois, l'objectif du modèle que l'on recherche est d'estimer la puissance produite par la chaîne photovoltaïque. Par conséquent, ces modèles physiques ne sont pas nécessaires et un modèle mathématique de base qui caractérise le système est utilisé. Ce modèle utilisé surtout pour le dimensionnement d'un champ photovoltaïque est exprimé par l'équation [HGK09] :

$$P_{PV} = A_m \eta_m P_f \eta_{pc} I \quad (3.5)$$

Où A_m est la surface du champ photovoltaïque, η_m est le rendement de référence du module (supposé être 0,11), P_f est le facteur de conditionnement (supposé être 0,9), η_{pc} est le rendement de conditionnement de la puissance (supposé être 0,86), et I est l'irradiation solaire en W/m^2 .

Le modèle des panneaux photovoltaïques est alors un gain G transformant l'irradiation solaire globale incidente $I(W/m^2)$ en puissance électrique $P_{PV}(W)$:

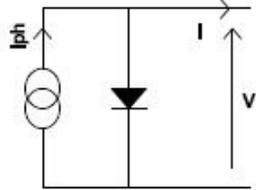
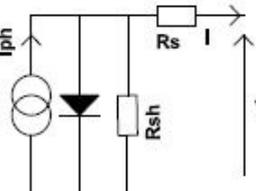
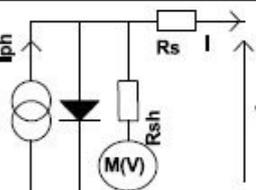
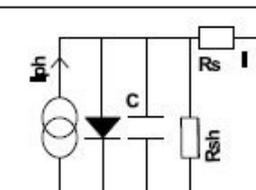
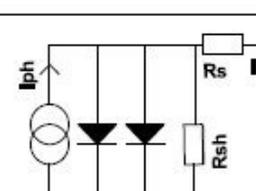
Modèle	Schéma	Nombre de Paramètres	Précision
<i>Idéal</i>		3	<i>Faible</i>
<i>Une Diode</i>		5	<i>Bien</i>
<i>Bishop</i>		8	<i>Bien, avec la représentation en régime inverse</i>
<i>Dynamique à une Diode</i>		6	<i>Bien, avec la représentation en régime dynamique</i>
<i>Deux Diodes</i>		7	<i>Très Bien</i>

TABLE 3.1 – Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque

$$P_{PV} = G.I \tag{3.6}$$

La figure 3.6 représente la puissance produite par les panneaux mono-cristallins en fonction de l'irradiation solaire à partir des données obtenues par simulation sur TRNSYS.

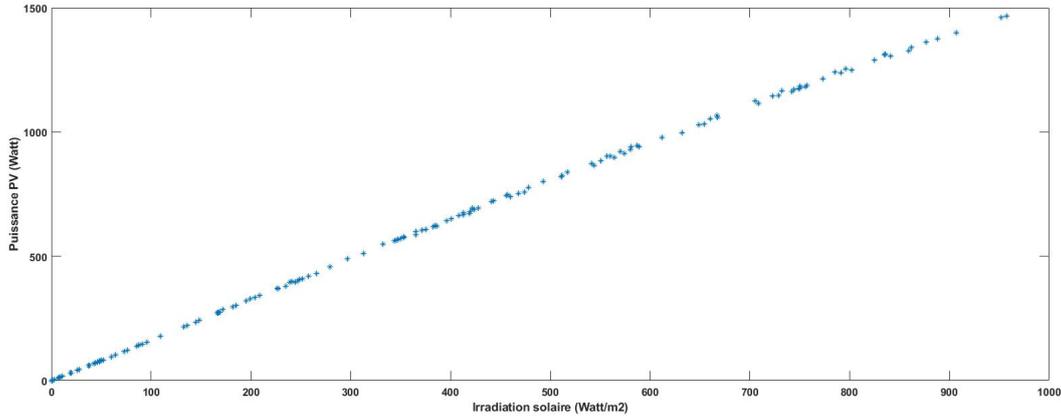


FIGURE 3.6 – Puissance produite en fonction de l'irradiation solaire

Une simulation est réalisée sur TRNSYS de six panneaux photovoltaïques montés en série. Les données générées d'entrée de l'irradiation solaire incident et de la sortie de la puissance produite sont divisées sur deux partie. La première partie est utilisée pour estimer la valeur du gain G et la deuxième partie est utilisée pour valider le modèle. La figure 3.7 représente l'irradiation solaire incident sur la surface des panneaux photovoltaïques en (Watt/m2), et la figure 3.8 représente la puissance produite en (Watt) mesurée à partir du modèle physique sur TRNSYS et l'autre estimée par l'équation (3.6) où $G = 1.59$. les deux modèles donnent un résultat identique.

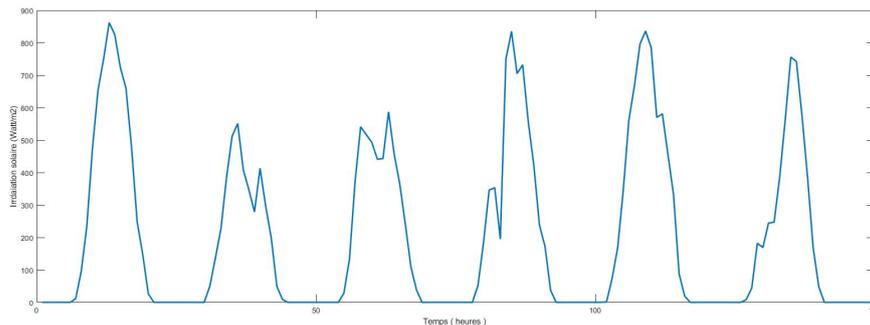


FIGURE 3.7 – Irradiation solaire incident sur les surfaces des panneaux

3.4 Batteries

Pour la gestion de charge/décharge des batteries, l'état de charge souvent noté (SoC) pour "State Of Charge" est l'indice le plus important, car il indique la capacité disponible

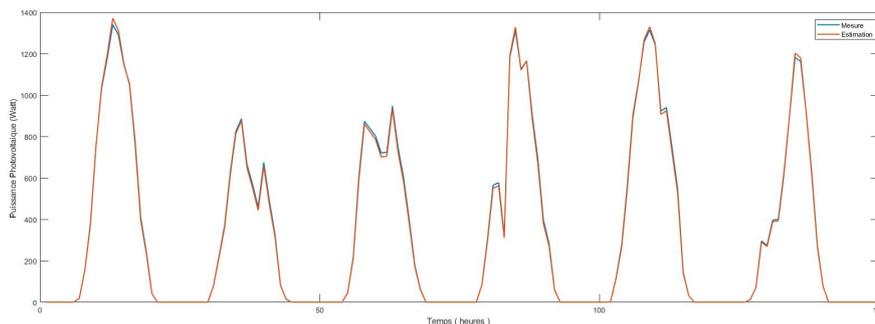


FIGURE 3.8 – Puissance produite par les panneaux photovoltaïques

dans la batterie. L'état de charge n'est pas directement lié à un ou quelques paramètres facilement mesurables, il est donc nécessaire de considérer les différentes propriétés électriques et électrochimiques de la batterie, telles que la tension en circuit ouvert, la tension de charge, le courant, la température, l'impédance interne, la densité de l'électrolyte et sa conductivité. Un bon "mélange" de ces paramètres à l'aide de divers algorithmes permet de disposer d'une estimation de cet état de charge. Dans la littérature, les méthodes principales d'estimer l'état de charge d'une batterie sont [Abd10] :

- *Méthode basée sur des mesures de densité de l'électrolyte* : Pour certains types de batteries, notamment les batteries au plomb utilisées dans notre système, La densité de l'électrolyte est une fonction quasi linéaire de l'état de charge. La mesure de la densité de l'électrolyte avec un hydromètre fournit donc théoriquement une estimation directe de l'état de charge. Malheureusement, en réalité, ce n'est pas si simple : cette densité n'est pas homogène dans toute la batterie et la relation n'est vraiment linéaire que pendant la décharge à courant constant. Des changements relativement brusques peuvent se produire lors de grands transitoires de courant et peuvent induire en erreur l'estimateur. En outre, la mesure de cette densité nécessite l'installation de capteurs à l'intérieur des batteries, ce qui peut entraîner des problèmes d'étanchéité.

- *Méthode basée sur des mesures d'impédance* : Son principe de base est d'imposer une excitation de tension ou de courant à la batterie afin de déterminer une estimation de son impédance interne à partir de la réponse de la batterie à cette excitation. Ensuite établir le lien entre l'impédance interne et l'état de charge. En pratique, les mesures d'impédance sont souvent utilisées sur des batteries stationnaires pour des raisons de simplicité d'utilisation.

- *Méthode basée sur des mesures de tension* : En mesurant la tension, corrigée de l'influence du courant de décharge et de la température selon des courbes typiques, qui sont entrées dans la mémoire d'un microprocesseur, l'état de charge de la batterie peut être déterminé avec une précision de quelques pour cent. Après chaque charge, la mesure de la tension en circuit ouvert après une certaine période de repos est utilisée pour "réinitialiser" l'algorithme utilisé. Cela prend en compte l'âge de la batterie et une certaine dérive de ses caractéristiques dans le temps.

- *Méthode basée sur des mesures de courant* : Cette méthode est dite coulométrique ou Ampèremétrique. Étant donné que l'on connaît, lors de la charge ou lors de la décharge, le

nombre d'ampère-heure que l'on a injecté ou extrait de la batterie et le rendement en Ah de celle-ci, on peut déterminer son état de charge à tout instant. En effet, il suffit de mesurer le courant lors de la décharge et de retrancher l'intégrale de cette quantité hors de celle injectée lors de la charge, multipliée par le rendement. En général, le rendement charge/décharge est modélisé par la loi de Peukert, selon laquelle la quantité d'Ah que l'on pourra extraire de la batterie diminue avec l'intensité du courant de décharge. L'effet de la température est aussi souvent pris en compte.

Dans ce travail nous allons utiliser cette dernière méthode coulométrique qui est plus fiable et plus facile à mettre en œuvre. On considère les trois simplifications suivantes : le rendement est égal à 1, la tension aux bornes des batteries est constante et la quantité d'Ah que l'on pourra extraire de la batterie n'est pas influencé par l'intensité du courant de décharge. On exprimera l'état de charge en Watt-heure au lieu de l'Ampère-heure et donc c'est le flux de puissance envoyé ou soustrait des batteries qui sera considéré à la place du courant. L'expression de l'évolution de l'état de charge de la batterie dans un intervalle $[t_i, t_f]$ en fonction de la puissance est donnée par l'équation suivante :

$$\text{SoC}(t_f) = \text{SoC}(t_i) + \int_{t_i}^{t_f} P_{bat}(t) dt \quad (3.7)$$

considérant que la puissance échangée avec les batteries est constante pendant chaque pas d'échantillonnage, l'équation (3.7) devient :

$$\text{SoC}(k+1) = \text{SoC}(k) + P_{bat}(k) \cdot \Delta t \quad (3.8)$$

P_{bat} (Watt) est la puissance échangée avec les batteries, $P_{bat} > 0$ lors du chargement des batteries et $P_{bat} < 0$ lors du déchargement.

Δt est l' intervalle d'échantillonnage

La durée de vie des batteries, en plus du nombre de cycles de charge/décharge, dépend de nombreux facteurs, essentiellement la décharge profonde, la surcharge et la charge et la décharge trop rapide. Les recommandations du fabricant doivent donc être respectées pour éviter un vieillissement prématuré, c'est pourquoi deux contraintes sont ajoutées pour compléter le modèle de la batterie.

$$\underline{\text{SoC}} \leq \text{SoC} \leq \overline{\text{SoC}} \quad (3.9)$$

$$\underline{P_{bat}} \leq P_{bat} \leq \overline{P_{bat}} \quad (3.10)$$

Cela signifie que la puissance P_{bat} qui peut être envoyée ou soustraite des batteries est limitée ainsi que la capacité de la batterie SoC est généralement limitée entre 20% et 95% de la capacité totale.

3.5 Interaction avec le réseau public

Le micro-réseau étudié est capable de fonctionner en mode îloté (autonome) mais peut également se connecter au réseau public, dans ce cas le micro-réseau peut vendre et acheter de

l'énergie au réseau public.

Pour garder la même convention de signe utilisée pour le flux de puissance échangé avec les batteries, la puissance P_{grid} (Watt) présente un signe positif si la puissance est envoyée vers le réseau (vendue) et négatif sinon (énergie achetée).

3.6 Pompe à chaleur

La pompe à chaleur présentée dans la figure 3.9 fournit un flux de chaleur ϕ_{Hp} en (J/h) donné par :

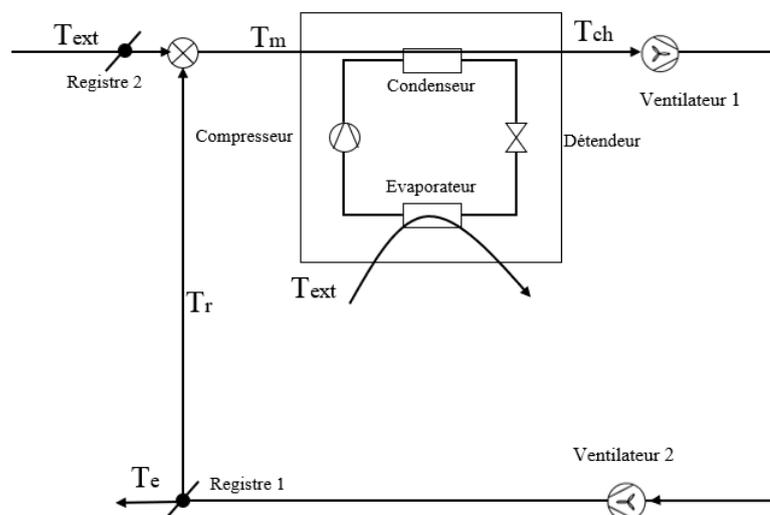


FIGURE 3.9 – Pompe à chaleur

$$\phi_{Hp} = \dot{m} \cdot C \cdot (T_{ch} - T_m) \quad (3.11)$$

\dot{m} : le débit d'air chauffé (Kg/h)

C : capacité calorifique de l'air à pression constante (J/Kg.K)

T_m : la température initiale de l'air mélangé (°C)

T_{ch} : la température de l'air mélangé chauffé qui sera soufflé dans la zone (°C)

La puissance électrique consommée essentiellement par le compresseur et par les ventilateurs est donnée par :

$$P_{elec} = \frac{\phi_{Hp}}{COP} + \sum_1^2 P_{Vi} \quad (3.12)$$

ϕ_{Hp} : flux de chaleur en Watt.

COP : Coefficient de performance de la pompe à chaleur considéré constant.

P_{Vi} : Puissance électrique du ventilateur i .

A des fins de contrôle plusieurs modèles de la capacité de chauffage d'une pompe à chaleur ont été étudiés [WMHS15], [KMW⁺13], [SFL06], [AJS15], [CS14]. Le modèle proposé pour la température de chauffage est donné par :

$$T_{ch}(k+1) = \alpha T_{ch}(k) + \beta S(k) + \delta T_m(k) + \varpi T_{ext}(k) \quad (3.13)$$

T_{ch} : la température de l'air mélangé et chauffé qui sera soufflé dans la zone.

S : est un signal de commande permettant de moduler la puissance du compresseur.

T_{ext} : la température de l'air extérieur.

T_m : la température initiale de l'air mélangé.

Avec :

$$T_m(k) = \zeta T_z(k) + \lambda T_{ext}(k) \quad (3.14)$$

le modèle de la température de chauffage devient :

$$T_{ch}(k+1) = \alpha T_{ch}(k) + \beta S(k) + \theta T_z(k) + \sigma T_{ext}(k) \quad (3.15)$$

Les résultats de validation de ce modèle sont présentés dans les figures 3.10 et 3.11 qui représentent respectivement la température de chauffage en fonction de la température extérieure (pour T_m et S constantes) et la température de chauffage en fonction de la commande (pour T_m et T_{ext} constantes).

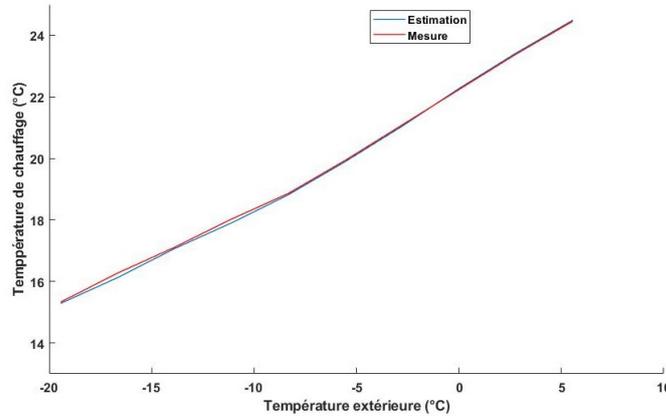


FIGURE 3.10 – Température de chauffage en fonction de la température extérieure

3.7 Bâtiment

Les modèles de zones d'un bâtiment existent avec différents niveaux de complexité : de simples modèles avec un nœud d'air représentant tout le volume d'air dans la pièce à des modèles complexes de dynamique des fluides computationnelle résolvant les équations de conservation de la masse, du moment et de l'énergie. Les principaux modèles sont :

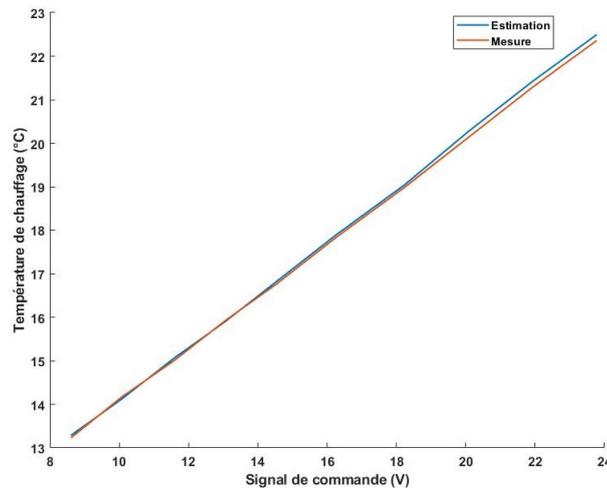


FIGURE 3.11 – Température de chauffage en fonction du signal de commande

- *Modèles CFD (Computational Fluid Dynamics CFD)* : Les modèles CFD [Com91], [Inc98], sont utilisés pour les études de confort et la prévision du débit d'air dans les zones car ils fournissent des informations détaillées sur les conditions dans la zone. À l'aide de modèles CFD, l'air ambiant d'une pièce est divisé en un grand nombre d'éléments finis ou de volumes (cellules). Dans chacune des cellules, les équations de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie sont résolues afin d'obtenir les conditions dans toute la pièce. Comme les calculs CFD prennent beaucoup de temps en raison du nombre élevé de cellules, ils sont surtout utilisés pour l'étude de régimes permanents. À ce jour, les phénomènes transitoires sont rarement étudiés [RCB98], [LCLF00].

- *Modèles zonaux (Zonal models)* : Les modèles zonaux représentent un type de modèle moins complexe par rapport aux modèles CFD. Ils divisent l'air ambiant d'une pièce en un nombre réduit de sous-volumes d'air. Contrairement aux modèles CFD, seules les équations de conservation de la masse et de l'énergie sont résolues. Bien qu'ils se soient principalement développés pour l'étude du confort et donc pour le régime permanent, ils ont également été utilisés pour la simulation de phénomènes transitoires [Dur94], [MWWA01].

- *Modèles obtenus par identification* : Ce modèle est obtenu sur la base des mesures effectuées sur les entrées et les sorties ; sa structure est soit établie à partir des équations physiques ou des équations paramétrées (fonction de transfert, récurrente ARX, OE...). Ce concept pourrait être intéressant en raison de la possibilité de représenter les phénomènes observés tout en maintenant le modèle à un niveau de détail minimum. Cependant, les modèles d'identification ont l'inconvénient de n'être valables que dans la limite des conditions sur lesquelles ils sont basés. L'extrapolation en dehors de cette fourchette donnée par le processus d'identification est risquée par rapport aux modèles physiques.

- *Modèles obtenus par la théorie bond graph* : Ce type de modèle permet par sa nature graphique, à l'aide d'un langage unifié d'afficher explicitement les phénomènes de transfert de chaleur et d'énergie, par ailleurs, le modèle bond graph est évolutif, ce qui permet d'affiner

le modèle par ajout de nouveaux éléments (perte thermique, effet d’inertie, etc.). En plus ce modèle permet de localiser les variables d’état et de déduire plus simplement les équations d’état pour des raisons de contrôle, en effet les variables d’état dans un système de bâtiment sont la quantité d’énergie (J) stockée dans les différentes zones et les entrées (commandables ou non) sont représentées de façon génériques par les sources d’effort et de flux qui sont ici les sources de température et de flux de chaleur [OBDT06], [TB00].

- *Modèles de type ‘Lumped parameters’* : À des fins de contrôle, on utilise principalement ce type de modèles [Lar], [HND98],[Osm96]. Il présente l’avantage d’un faible nombre de paramètres. Un ensemble de quelques paramètres décrit le système. Un modèle lumped parameters peut intégrer le modèle de la pièce entière (convection, conduction et rayonnement). Ce dernier est actuellement utilisé pour simuler des pièces dans le cadre d’études de contrôleurs. Cette modélisation permet des simulations rapides. Le modèle peut être décrit par analogie thermo-électrique résumé dans le tableau 3.2.

Thermodynamique	Électrique
Température	Tension
Flux de chaleur	Courant
Résistance de transmission de chaleur	Résistance
Capacité thermique	Capacité
Équation de conservation d’énergie thermique	Loi des noeuds

TABLE 3.2 – Analogie thermodynamique électrique .

Ainsi, pour les éléments passifs, le mur est généralement représenté par une branche 2R-C ou 3R-2C ou tout simplement R. On peut également voir le toit et le sol comme une sorte de mur, et ils sont donc modélés par la même branche. On peut représenter chaque mur par une branche ou faire une abstraction et représenter tout l’enveloppe du bâtiment par une seule branche. La masse thermique interne est généralement représentée par une seule capacité, bien que certains auteurs l’aient modélisée par 2R-2C [WX06] ou l’ont même omis [BnGRLr92]. Les fenêtres n’accumulent pas de l’énergie thermique et sont donc représentées comme de simples résistances. La ventilation et les infiltrations sont également modélisées par une résistance. Pour les éléments actifs, les températures de l’air extérieur et du sol sont modélisées par des sources de tension. Le rayonnement solaire incident sur le bâtiment et surtout le rayonnement qui traverse le vitrage pour atteindre directement la masse interne, Le flux de chaleur interne libre (occupants et appareils électriques), et le flux de chaleur dus à la contribution des terminaux de chauffage sont représentés par des sources de courant. Un circuit électrique équivalent au bâtiment est obtenu par l’assemblage de toutes les branches des murs, fenêtres, masse intérieure, etc.

En résolvant ce circuit électrique, en appliquant la loi des noeuds équivalente à l’équation de conservation d’énergie, le modèle sous forme d’équations d’état est obtenu. Plusieurs auteurs [Lar], [Rou84] ont étudié ce type de modèle et ont trouvé un résultat acceptable par rapport à des modèles plus détaillés. Les paramètres de ce modèle peuvent être physiques caractérisants les éléments de construction du bâtiment ou obtenus par identification.

3.7.1 Modèle Monozone

Dans cette partie, on considère tout d’abord un bâtiment constitué d’une seule zone comme montré sur la figure 3.12, ensuite dans la partie suivante un bâtiment multi-zones. La variation

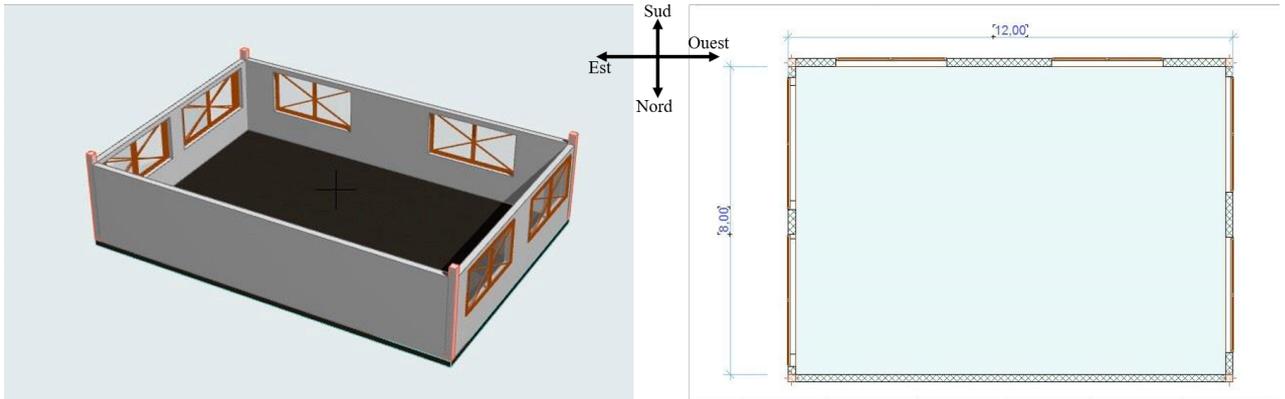


FIGURE 3.12 – Bâtiment Monozone

de température à l'intérieur de la zone obéit à la relation de bilan thermique suivante :

$$M.C \frac{dT_z}{dt} = \phi_{\text{apports}} - \phi_{\text{pertes}} \quad (3.16)$$

avec :

T_z : la température intérieure de la zone ($^{\circ}C$)

M : Masse d'air à l'intérieur de la zone (kg)

C : Capacité calorifique de l'air à pression constante (J/kg.K)

ϕ_i : Flux de chaleur (J/h).

- Les apports thermiques considérés ici se composent de deux types :
 - Les apports thermiques libres : le rayonnement solaire traversant les fenêtres ϕ_s et l'apport des occupants ϕ_{occup} .

Le flux du rayonnement solaire s'écrit :

$$\phi_s = I.Sf \quad (3.17)$$

avec :

I : le rayonnement solaire incident sur les fenêtres (J/h.m²).

Sf : la surface des fenêtres (m²).

Du fait que le rayonnement solaire dépend de l'orientation de la surface qui y est exposée, le flux du rayonnement est la somme de 4 flux incidents sur les 4 façades de la zone dont chaque façade a une orientation :

$$\phi_s = \sum_{k=1}^4 I_i . Sf_i \quad (3.18)$$

avec :

I_i : le rayonnement solaire incident sur la façade i.

S_{fi} : la surface des fenêtres de la façade i .

Dans la suite on considère les orientations conventionnelles Est, Ouest, Sud et Nord et leur rayonnements correspondants I_e , I_w , I_s et I_n . Et les surface de fenêtres de chaque façade sont S_{fe} , S_{fw} , S_{fs} et S_{fn} .

Le flux des occupants est donné par :

$$\phi_{\text{occup}} = Q.N \quad (3.19)$$

avec :

Q : l'apport d'un seul occupant (Watt)

N : le nombre d'occupants.

- Les apports thermiques forcés : l'apport du système de chauffage ϕ_c qui envoie un débit d'air chaud dans la zone.

l'apport thermique du chauffage s'écrit :

$$\phi_c = \dot{m}.C.(T_{ch} - T_z) \quad (3.20)$$

avec :

\dot{m} : Débit massique de l'air fournit par le système de chauffage (kg/h)

T_{ch} : la température de l'air soufflé dans la zone par le système de chauffage ($^{\circ}C$)

• Les pertes thermiques : sont liées au flux thermique dû à l'échange entre la température de l'air dans la zone et la température de l'air extérieur, cet échange se fait à travers l'enveloppe de la zone :

$$\phi_{ext} = \frac{T_z - T_{ext}}{R} \quad (3.21)$$

avec :

T_{ext} : la température de l'air extérieur ($^{\circ}C$)

R : la résistance thermique de l'enveloppe de la zone (K/watt)

La résistance thermique d'un matériau est :

$$R = \frac{e}{K.S} \quad (3.22)$$

avec :

e : l'épaisseur du matériau (m)

K : la conductivité thermique du matériau (watt/m.K)

S : la surface du matériau (m^2)

Ainsi la résistance thermique de chaque façade est calculée comme étant la mise en parallèle des 2 résistances thermiques du mur et des fenêtres. Et la résistance thermique totale de l'enveloppe est la somme des résistances des 4 façades.

Pour l'homogénéisation des unités de l'équation du bilan thermique, il faut multiplier la conductivité thermique K par 3600 ainsi elle sera exprimée en [J/h.m.K] et par conséquent la résistance

thermique R sera exprimée en [K.h/J] . De même l'apport d'un occupant Q en [Watt] sera multiplié par 3600 et devient en [J/h]. En revanche, il n'est pas nécessaire de convertir les températures en Kelvin car dans tous les termes, il s'agit d'une différence et donc les températures peuvent également s'exprimer en [$^{\circ}C$].

En remplaçant chaque terme par son expression, l'équation (3.16) devient :

$$MC \frac{dT_z}{dt} = \dot{m}C(T_{ch} - T_z) + \frac{T_{ext} - T_z}{R} + Sfe.Ie + Sfw.Iw + Sfs.Is + Sfn.In + Q.N \quad (3.23)$$

soit encore :

$$\frac{dT_z}{dt} = -\frac{1}{M}\dot{m}T_z - \frac{1}{MCR}T_z + \frac{1}{M}\dot{m}T_{ch} + \frac{1}{MCR}T_{ext} + \frac{Sfe}{MC}Ie + \frac{Sfw}{MC}Iw + \frac{Sfs}{MC}Is + \frac{Sfn}{MC}In + \frac{Q}{MC}N \quad (3.24)$$

Cette équation s'écrit sous la forme d'état non linéaire :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + u^1 D_1 x + u^1 D_2 u^2 + B_d d \\ y &= x \end{aligned} \quad (3.25)$$

avec :

$x = [T_z]$ - l'état du système.

$y = [T_z]$ - la sortie du système.

$u = [\dot{m} T_{ch}]^T$ - les entrées de commande (où la notation u^i désigne la i ème entrée)

$d = [T_{ext} Ie Iw Is In N]^T$ - les entrées non commandables mais mesurables.

Si on considère que le débit d'air est fixe, le modèle (3.24) peut être alors écrit sous la forme d'équation d'état linéaire :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + B_d d \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.26)$$

$x = [T_z]$ - l'état du système.

$y = [T_z]$ - la sortie du système.

$u = [T_{ch}]$ - l'entrée de commande.

$d = [T_{ext} Ie Iw Is In N]^T$ - les entrées non commandables mais mesurables.

$$A = \left[-\frac{1}{M}\dot{m} - \frac{1}{MCR} \right], B = \left[\frac{1}{M}\dot{m} \right]$$

$$B_d = \left[\frac{1}{MCR} \quad \frac{Sfe}{MC} \quad \frac{Sfw}{MC} \quad \frac{Sfs}{MC} \quad \frac{Sfn}{MC} \quad \frac{Q}{MC} \right], C = [1]$$

3.7.2 Modèle Multi-zones

Dans le cas d'un bâtiment multizone, il faut en plus prendre en considération l'interaction entre les zones adjacentes exprimée par : $\frac{T_i - T_j}{R_{ij}}$ qui désigne le flux de chaleur de la zone i à la zone j tel que T_i est la température de la zone adjacente, T_j est la température de la zone en question et R_{ij} est la résistance du mur séparant les deux zones. En ajoutant autant de terme $\frac{T_i - T_j}{R_{ij}}$ que de zones adjacentes à l'équation (3.23) qui décrit l'évolution de la température d'une zone, on obtient le modèle d'un bâtiment multi-zone. Ainsi le modèle général du bâtiment multizone à n zones peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{T}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & \frac{1}{M_1 C R_{21}} & \cdots & \frac{1}{M_1 C R_{n1}} \\ \frac{1}{M_2 C R_{12}} & A_{22} & \cdots & \frac{1}{M_2 C R_{n2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{M_n C R_{1n}} & \frac{1}{M_n C R_{2n}} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_2} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{M_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_1 T_{ch} \\ \dot{m}_2 T_{ch} \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{m}_n T_{ch} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1 C R_{01}} & \frac{Sfe_1}{M_1 C} & \frac{Sfw_1}{M_1 C} & \frac{Sfs_1}{M_1 C} & \frac{Sfn_1}{M_1 C} & \frac{Q_1}{M_1 C} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{1}{M_n C R_{0n}} & \frac{Sfe_n}{M_n C} & \frac{Sfw_n}{M_n C} & \frac{Sfs_n}{M_n C} & \frac{Sfn_n}{M_n C} & 0 & \cdots & 0 & \frac{Q_n}{M_n C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ Ie \\ Iw \\ Is \\ In \\ N_1 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Avec :

$$\begin{aligned} A_{11} &= - \left(\frac{\dot{m}_1}{M_1} + \frac{1}{M_1 C R_{01}} + \frac{1}{M_1 C R_{21}} + \cdots + \frac{1}{M_1 C R_{n1}} \right) \\ A_{22} &= - \left(\frac{\dot{m}_2}{M_2} + \frac{1}{M_2 C R_{02}} + \frac{1}{M_2 C R_{12}} + \cdots + \frac{1}{M_2 C R_{n2}} \right) \\ &\vdots \\ A_{nn} &= - \left(\frac{\dot{m}_n}{M_n} + \frac{1}{M_n C R_{0n}} + \frac{1}{M_n C R_{1n}} + \cdots + \frac{1}{M_n C R_{n-1n}} \right) \end{aligned}$$

Ce modèle reste non linéaire et s'écrit sous la forme :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \sum_{i=1}^n u^i D_i x + \sum_{i=1}^n u^i M_i u^{n+1} + B_{ad} \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.28)$$

avec :

$x = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n]^T$ - le vecteur d'état.

$y = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n]^T$ - le vecteur des sorties observées du système.

$u = [\dot{m}_1 \ \dot{m}_2 \ \dots \ \dot{m}_n \ T_{ch}]^T$ - le vecteur des entrées de commande.

$d = [T_{ext} \ I_e \ I_w \ I_s \ I_n \ N_1 \ N_2 \ \dots \ N_n]^T$ - le vecteur des entrées non commandables mais mesurables.

Si on remplace T_{ch} par son expression dans l'équation (3.13) le modèle (3.27) devient :

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \vdots \\ \dot{T}_n \\ \dot{T}_{ch} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & \frac{1}{M_1 C R_{21}} & \dots & \frac{1}{M_1 C R_{n1}} & 0 \\ \frac{1}{M_2 C R_{12}} & A_{22} & \dots & \frac{1}{M_2 C R_{n2}} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{M_n C R_{1n}} & \frac{1}{M_n C R_{2n}} & \dots & A_{nn} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \\ T_{ch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \vdots \\ \dot{m}_n \\ S \end{bmatrix} \\
&+ \dot{m}_1 \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{M_1} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \\ T_{ch} \end{bmatrix} + \dot{m}_2 \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ -\frac{1}{M_2} & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{M_2} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \\ T_{ch} \end{bmatrix} \\
&+ \dots + \dot{m}_n \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{M_n} & \frac{1}{M_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \\ T_{ch} \end{bmatrix} + S \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \\ T_{ch} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1 C R_{01}} & \frac{Sf_{e1}}{M_1 C} & \frac{Sf_{w1}}{M_1 C} & \frac{Sf_{s1}}{M_1 C} & \frac{Sf_{n1}}{M_1 C} & \frac{Q_1}{M_1 C} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{1}{M_n C R_{0n}} & \frac{Sf_{en}}{M_n C} & \frac{Sf_{wn}}{M_1 C} & \frac{Sf_{sn}}{M_1 C} & \frac{Sf_{nn}}{M_1 C} & 0 & \dots & 0 & \frac{Q_n}{M_n C} & 0 \\ \varpi & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ I_e \\ I_w \\ I_s \\ I_n \\ N_1 \\ \vdots \\ N_n \\ T_m \end{bmatrix} \quad (3.29)
\end{aligned}$$

Avec :

$$A_{11} = - \left(\frac{1}{M_1 C R_{01}} + \frac{1}{M_1 C R_{21}} + \dots + \frac{1}{M_1 C R_{n1}} \right)$$

$$A_{22} = - \left(\frac{1}{M_2 C R_{02}} + \frac{1}{M_2 C R_{12}} + \dots + \frac{1}{M_2 C R_{n2}} \right)$$

⋮

$$A_{nn} = - \left(\frac{1}{M_n C R_{0n}} + \frac{1}{M_n C R_{1n}} + \dots + \frac{1}{M_n C R_{n-1n}} \right)$$

Le modèle obtenu est bi-linéaire et s'écrit sous la forme :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \sum_{i=1}^{n+1} u^i D_i x + B_d d \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{3.30}$$

avec :

$x = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n \ T_{ch}]^T$ - le vecteur d'état.

$y = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n \ T_{ch}]^T$ - le vecteur des sorties observées du système.

$u = [\dot{m}_1 \ \dot{m}_2 \ \dots \ \dot{m}_n \ S]^T$ - le vecteur des entrées de commande.

$d = [T_{ext} \ Ie \ Iw \ Is \ In \ N_1 \ N_2 \ \dots \ N_n \ T_m]^T$ - le vecteur des entrées non commandables mais mesurables.

Procédons maintenant à la linéarisation du système (3.27). La linéarisation d'un système se fait autour d'un point d'équilibre qu'il faut définir, et le modèle linéarisé obtenu correspond à la relation entre la variation des entrées et la variation des sorties du système autour de ce point d'équilibre.

Soient u_0 et d_0 les entrées du système au point d'équilibre et soient x_0 et y_0 l'état et la sortie correspondants.

A l'équilibre :

$$\dot{x} = 0 = f(x_0, u_0, d_0) \tag{3.31}$$

Connaissant u_0 et d_0 , la résolution de ce système d'équations permet d'obtenir les valeurs d'états x_0 et par conséquent les valeurs de sorties y_0 .

La variation des entrées autour de leurs valeurs au point d'équilibre est exprimée par : $u = u_0 + \Delta u$ et $d = d_0 + \Delta d$. Cette variation des entrées affecte le système et fait varier la valeur de l'état et de la sortie autour de leurs valeurs à l'équilibre exprimées par : $x = x_0 + \Delta x$ et $y = y_0 + \Delta y$.

Le modèle linéarisé est obtenu par les matrices Jacobiennes :

$$\Delta \dot{x} = \begin{bmatrix} \left. \begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \end{array} \right\} \Delta x + \begin{bmatrix} \left. \begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1}{\partial \dot{m}_1} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{m}_n} \Big|_0 & \frac{\partial T_{ch}}{\partial f_2} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial \dot{m}_1} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \dot{m}_n} \Big|_0 & \frac{\partial T_{ch}}{\partial f_2} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_n}{\partial \dot{m}_1} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial \dot{m}_n} \Big|_0 & \frac{\partial T_{ch}}{\partial f_n} \Big|_0 \end{array} \right\} \Delta u + \begin{bmatrix} \left. \begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1}{\partial d_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_1}{\partial d_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial d_{n+5}} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial d_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_2}{\partial d_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial d_{n+5}} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_n}{\partial d_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_n}{\partial d_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial d_{n+5}} \Big|_0 \end{array} \right\} \Delta d \quad (3.32)$$

$$\Delta y = C \Delta x$$

Le modèle linéarisé obtenu à partir du modèle non linéaire (3.27) peut s'écrire sous la forme d'équation d'état linéaire :

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_d d$$

$$y = Cx$$

tel que :

$x = [\Delta T_1 \ \Delta T_2 \ \dots \ \Delta T_n]^T$ - le vecteur d'état.

$y = [\Delta T_1 \ \Delta T_2 \ \dots \ \Delta T_n]^T$ - le vecteur des sorties observées du système.

$u = [\Delta \dot{m}_1 \ \Delta \dot{m}_2 \ \dots \ \Delta \dot{m}_n \ \Delta T_{ch}]^T$ - le vecteur des entrées de commande.

$d = [\Delta T_{ext} \ \Delta I_e \ \Delta I_w \ \Delta I_s \ \Delta I_n \ \Delta N_1 \ \Delta N_2 \ \dots \ \Delta N_n]^T$ - le vecteur des entrées non commandables mais mesurables.

Pour l'application on considère un bâtiment à 3 zones illustré par la figure 3.13.

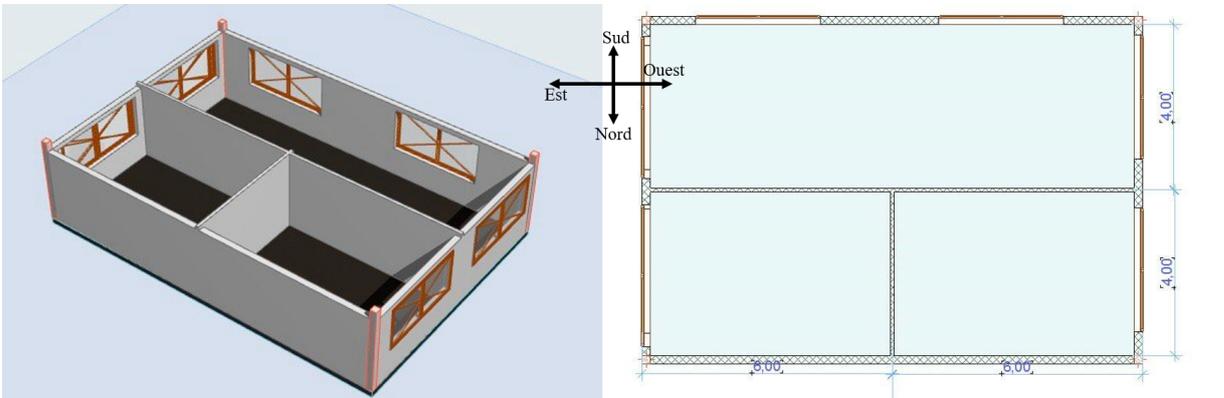


FIGURE 3.13 – Bâtiment Multizone

Le modèle linéarisé obtenu à partir du modèle non linéaire (3.27) pour ce bâtiment s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + B_d d \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.33)$$

tel que :

$x = [\Delta T_1 \Delta T_2 \Delta T_3]^T$ - le vecteur d'état.

$y = [\Delta T_1 \Delta T_2 \Delta T_3]^T$ - le vecteur des sorties observées du système.

$u = [\Delta \dot{m}_1 \Delta \dot{m}_2 \Delta \dot{m}_3 \Delta T_{ch}]^T$ - le vecteur des entrées de commande.

$d = [\Delta T_{ext} \Delta I_e \Delta I_w \Delta I_s \Delta I_n \Delta N_1 \Delta N_2 \Delta N_3]^T$ - le vecteur des entrées non commandables mais mesurables.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \frac{1}{M_1 C R_{21}} & \frac{1}{M_1 C R_{31}} \\ \frac{1}{M_2 C R_{12}} & A_{22} & \frac{1}{M_2 C R_{32}} \\ \frac{1}{M_3 C R_{13}} & \frac{1}{M_3 C R_{23}} & A_{33} \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = -\frac{1}{M_1 C R_{01}} - \frac{1}{M_1 C R_{21}} - \frac{1}{M_1 C R_{31}} - \frac{\dot{m}_{10}}{M_1}$$

$$A_{22} = -\frac{1}{M_2 C R_{02}} - \frac{1}{M_2 C R_{12}} - \frac{1}{M_2 C R_{32}} - \frac{\dot{m}_{20}}{M_2}$$

$$A_{33} = -\frac{1}{M_3 C R_{03}} - \frac{1}{M_3 C R_{13}} - \frac{1}{M_3 C R_{23}} - \frac{\dot{m}_{30}}{M_3}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{T_{10}}{M_1} + \frac{T_{ch0}}{M_1} & 0 & 0 & \frac{\dot{m}_{10}}{M_1} \\ 0 & -\frac{T_{20}}{M_2} + \frac{T_{ch0}}{M_2} & 0 & \frac{\dot{m}_{20}}{M_2} \\ 0 & 0 & -\frac{T_{30}}{M_3} + \frac{T_{ch0}}{M_3} & \frac{\dot{m}_{30}}{M_3} \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1 C R_{01}} & \frac{S f e_1}{M_1 C} & 0 & 0 & \frac{S f n_1}{M_1 C} & \frac{Q}{M_1 C} & 0 & 0 \\ \frac{1}{M_2 C R_{02}} & 0 & \frac{S f w_2}{M_2 C} & 0 & \frac{S f n_2}{M_2 C} & 0 & \frac{Q}{M_2 C} & 0 \\ \frac{1}{M_2 C R_{03}} & \frac{S f e_3}{M_3 C} & \frac{S f w_3}{M_3 C} & \frac{S f s_3}{M_3 C} & 0 & 0 & 0 & \frac{Q}{M_3 C} \end{bmatrix}$$

$$C = I_3$$

et le modèle bilinéaire pour le même bâtiment s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \frac{1}{M_1 C R_{21}} & 0 & \frac{1}{M_1 C R_{n1}} & 0 \\ \frac{1}{M_2 C R_{12}} & A_{22} & 0 & \frac{1}{M_2 C R_{n2}} & 0 \\ \frac{1}{M_3 C R_{13}} & \frac{1}{M_3 C R_{23}} & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{ch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \dot{m}_3 \\ S \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \dot{m}_1 \begin{bmatrix} 1 & & & \\ -\frac{1}{M_1} & 0 & 0 & \frac{1}{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{ch} \end{bmatrix} + \dot{m}_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_2} & 0 & \frac{1}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{ch} \end{bmatrix} \\
& + \dot{m}_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{M_3} & \frac{1}{M_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{ch} \end{bmatrix} + S \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_{ch} \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} 1 & Sf_{e1} & Sf_{w1} & Sf_{s1} & Sf_{n1} & Q_1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{M_1 CR_{01}}{1} & \frac{M_1 C}{Sf_{e2}} & \frac{M_1 C}{Sf_{w2}} & \frac{M_1 C}{Sf_{s2}} & \frac{M_1 C}{Sf_{n2}} & \frac{Q_1}{M_1 C} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{M_2 CR_{02}}{1} & \frac{M_2 C}{Sf_{e3}} & \frac{M_1 C}{Sf_{w3}} & \frac{M_1 C}{Sf_{s3}} & \frac{M_1 C}{Sf_{n3}} & 0 & \frac{Q_2}{M_2 C} & 0 & 0 \\ \frac{M_3 CR_{03}}{\varpi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Q_3}{M_3 C} & 0 \\ & & & & & & & & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ I_e \\ I_w \\ I_s \\ I_n \\ N_1 \\ N_2 \\ N_2 \\ T_m \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

avec :

$$\begin{aligned}
A_{11} &= -\frac{1}{M_1 CR_{01}} - \frac{1}{M_1 CR_{21}} - \frac{1}{M_1 CR_{31}} \\
A_{22} &= -\frac{1}{M_2 CR_{02}} - \frac{1}{M_2 CR_{12}} - \frac{1}{M_2 CR_{32}} \\
A_{33} &= -\frac{1}{M_3 CR_{03}} - \frac{1}{M_3 CR_{13}} - \frac{1}{M_3 CR_{23}}
\end{aligned}$$

Le tableau 3.3 suivant donne les données qui caractérisent le bâtiment étudié et qui permettant de le modéliser.

Paramètre	Valeur
Longueur	12 m
Largeur	8 m
Hauteur	2.5 m
Conductivité thermique des murs extérieurs	0.038 W/m.k
Épaisseur des murs extérieurs	0.2 m
Conductivité thermique des fenêtres	0.078 W/m.k
Épaisseur des fenêtres	0.01 m
Surface d'une fenêtre	2 m ²
Nombre de fenêtres	2 (Est), 2 (Ouest) et 4 (Sud)
Conductivité thermique des murs intérieurs	0.06 W/m.k
Épaisseur des murs intérieurs	0.1 m

TABLE 3.3 – Paramètres du bâtiment.

3.8 Données Météorologiques

Dans le cadre de notre travail, l'information sur les données météorologiques est indispensable au bon fonctionnement du système et joue un rôle crucial dans la prise de décision pour le management d'énergie et la régulation thermique du bâtiment. Bien maîtriser les données météorologiques permet d'une part d'estimer les ressources en énergies renouvelables et gérer les conséquences liées à la variabilité climatique (assurer l'équilibre Production-Consommation, planifier les opérations de maintenance, ...), et permet d'autre part de planifier une stratégie de régulation assurant le confort thermique des occupants avec un minimum d'énergie.

3.8.1 Vitesse du vent

La première donnée est la vitesse du vent traversant les pales de l'éolienne, l'information sur la direction du vent n'est pas importante car l'éolienne est supposée toujours face au vent grâce à son dispositif d'orientation.

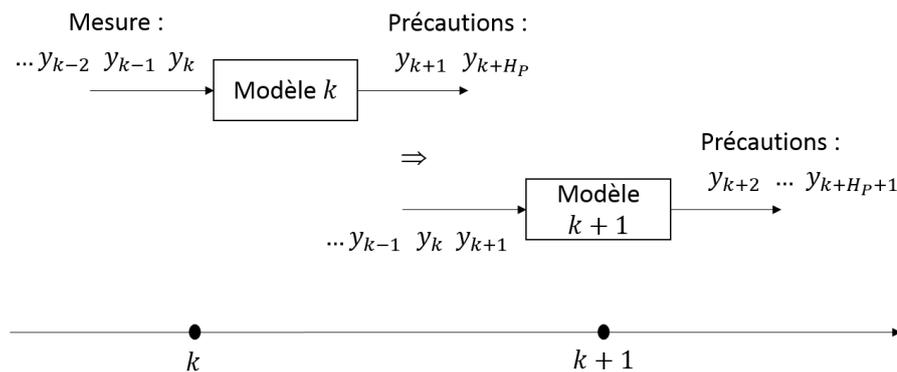


FIGURE 3.14 – Algorithme de prédiction de la vitesse du vent

Pour des raisons de simplicité, nous considérons un modèle d'interpolation et de prédiction linéaire. A chaque pas de temps k (0.1 heure), les coefficients de la droite d'interpolation ($x(k) = a.k + b$) sont estimés à partir des trois dernières mesures séparées de 0.1 heure par la méthode des moindres carrés, ensuite cette droite est utilisée pour prédire les valeurs futures sur un horizon de prédiction H_p . Cette procédure est répétée à chaque pas de temps comme montré sur la figure 3.14.

La figure 3.15 montre les résultats de prédiction sur différents horizons, (a) correspond à la prédiction d'une seule valeur future à chaque pas de temps $H_p = 1$ (6 min), (b) correspond à $H_p = 5$ (30 min), (c) à $H_p = 10$ (1 heure) et (d) à $H_p = 20$ (2 heures), plus l'horizon de prédiction est grand plus l'erreur entre les valeurs prédites et mesurées est grande.

Un horizon de prédiction $H_p = 10$ (1 heure) est retenu, car en plus de la qualité des prédictions, il va permettre au contrôleur MPC d'avoir une visibilité sur les données futures nécessaires pour calculer la séquence de commande optimale; ceci sera présenté dans le chapitre suivant dans

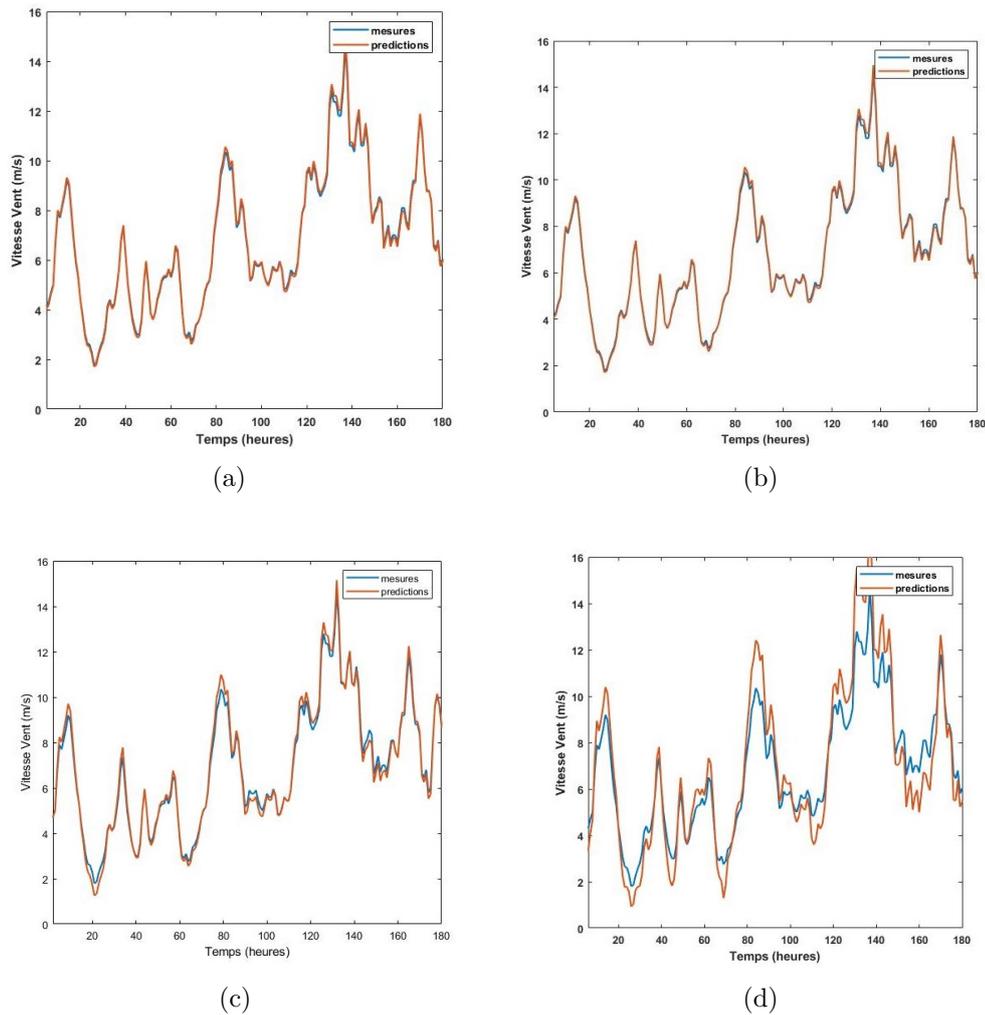


FIGURE 3.15 – Vitesse de vent prédite Vs Vitesse de vent mesurée pour différents horizons de prédiction

l'étude de l'impact de l'horizon de prédiction sur le contrôleur MPC. Dans la suite, les résultats des prédictions pour les autres données météorologiques sont calculées sur un horizon $H_p = 10$.

3.8.2 Température

La deuxième donnée est la température ambiante affectant le bâtiment et la pompe à chaleur. En utilisant le même algorithme que pour la vitesse du vent et un horizon de prédiction $H_p = 10$ on obtient le résultat montré sur la figure 3.16.

3.8.3 Rayonnement solaire

La troisième donnée est le rayonnement solaire incident sur le champ photovoltaïque et sur les surfaces de l'enveloppe du bâtiment. Habituellement, La quantité de rayonnement solaire n'est pas mesurée directement.

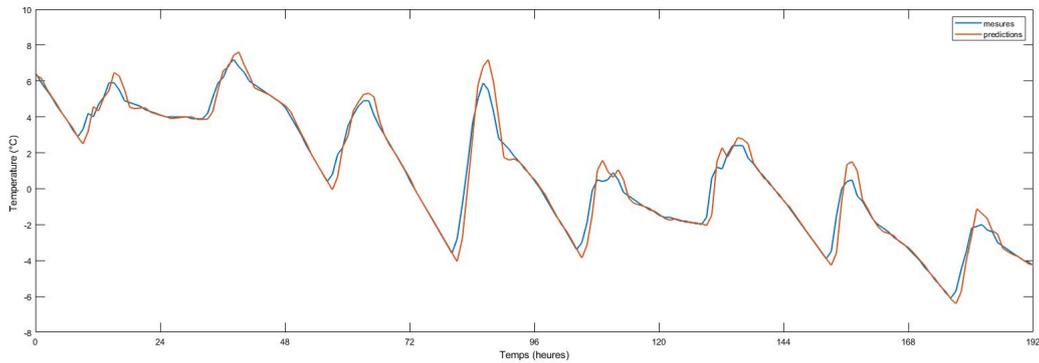


FIGURE 3.16 – Température ambiante prédite Vs Température ambiante mesurée

Le rayonnement global sur une surface s'obtient en ajoutant trois types de rayonnement : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi figure 3.17.

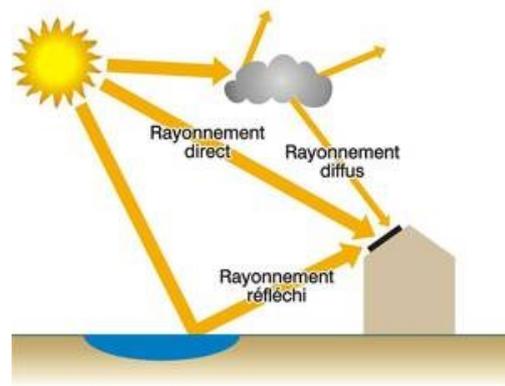


FIGURE 3.17 – Différents types de rayonnement

Rayonnement Direct : Le rayonnement solaire reçu du soleil sans avoir été diffusé par l'atmosphère.

Rayonnement Diffus : Le rayonnement solaire reçu du soleil après que sa direction a été modifiée par diffusion par l'atmosphère.

Rayonnement Réfléchi : Le rayonnement solaire renvoyé par le sol et l'environnement. Cette composante est nulle sur un plan horizontal.

l'information disponible est le rayonnement solaire direct I_b et diffus I_d incidents sur une surface horizontale, l'objectif alors est de pouvoir d'abord prédire les valeurs de ces deux grandeurs. Encore le même algorithmes des autres données météorologiques est utilisé, les figures 3.18 et 3.19 montrent respectivement les résultats du rayonnement direct et diffus reçu sur le plan horizontal.

Ensuite, à partir de cette information (rayonnement solaire direct I_b et diffus I_d incidents sur une surface horizontale), le rayonnement total I_T pour une surface quelconque (figure 3.20), avec une certaine inclinaison et orientation est calculé [DBB20].

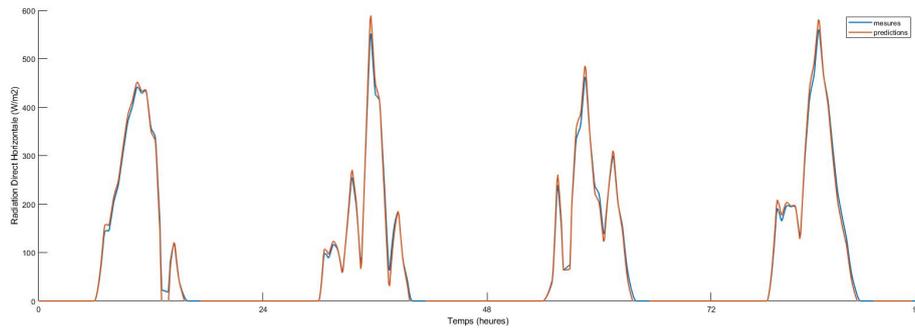


FIGURE 3.18 – Rayonnement solaire direct sur la surface horizontale

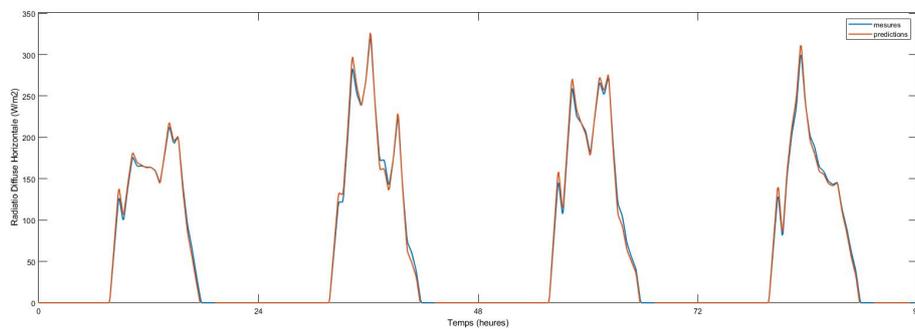


FIGURE 3.19 – Rayonnement solaire diffus sur la surface horizontale

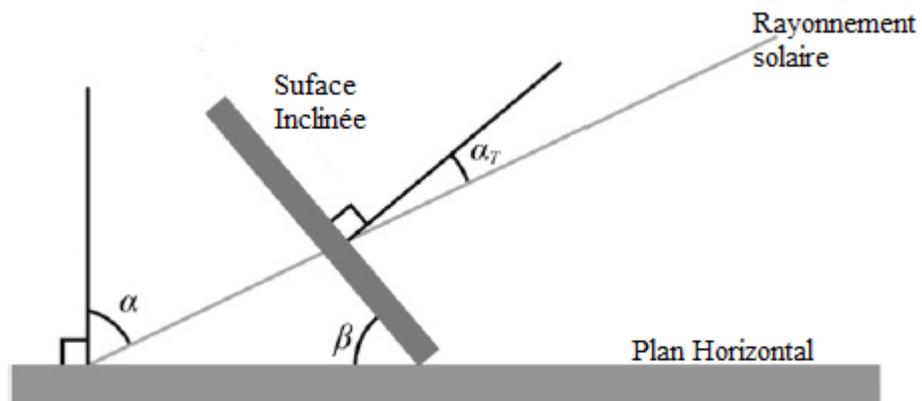


FIGURE 3.20 – Rayonnement solaire incident sur une surface inclinée.

Considérant un modèle isotrope du ciel, le rayonnement solaire totale est donné par :

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (3.34)$$

où l'albédo ρ_g du sol est généralement de 0,2 et le rapport entre le rayonnement solaire direct sur une surface inclinée et celui sur une surface horizontale est calculé par :

$$R_b = \frac{\cos(\alpha_T)}{\cos(\alpha)} \quad (3.35)$$

Les angles α et α_T sont les angles d'incidence du rayonnement direct sur les surfaces horizontales et inclinées respectivement, qui sont calculées par :

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) &= \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \\ \cos(\alpha_T) &= \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ &\quad + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \\ &\quad \times \cos(\gamma) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Tel que :

δ : **la déclinaison solaire**, pour un jour n de l'année, est donnée par :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3.37)$$

Pour de nombreuses applications, il est habituel d'exprimer la période de l'année en termes de n , le jour de l'année, et donc comme un nombre entier compris entre 1 et 365. Toutefois il est possible d'utiliser des valeurs non entières de n . Notez que le taux maximal de variation de la déclinaison est d'environ 0,4 par jour et que $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

ω : **l'angle horaire**, à un instant t , est donné par :

$$\omega = 15(t - 12) \quad (3.38)$$

t prend des valeurs de 1 à 24 ce qui fait que ω est négatif le matin et positif l'après midi.

ϕ : **la latitude** de l'endroit où se trouve le bâtiment.

γ : **l'azimut** de la surface (son orientation), la déviation de la projection sur un plan horizontal de la normale à la surface par rapport au méridien local, avec zéro plein sud, est négatif et ouest positif, $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

β : **l'inclinaison**, l'angle entre la surface en question et l'horizontale ; $0 \leq \beta \leq 180^\circ$. ($\beta > 90^\circ$ signifie que la surface a une composante orientée vers le bas).

Le tableau suivant résume l'azimut et l'inclinaison des différentes surfaces considérées.

surface	azimut	inclinaison
Panneaux Pv	0°	45°
Façade est est	-90°	90°
Façade sud	0°	90°
Façade ouest	90°	90°
Façade Nord	180°	90°

TABLE 3.4 – Azimut et inclinaison des surfaces

Étant donné que les façades de l'enveloppe du bâtiment sont perpendiculaires au plan horizontal ($\beta = 90^\circ$), l'angle d'incidence du rayonnement direct sur les façades (équation 3.36) devient :

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_T) &= -\sin(\delta) \cos(\phi) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\gamma) \cos(\omega) \\ &\quad + \cos(\delta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \end{aligned} \quad (3.39)$$

et le rayonnement solaire total (équation 3.34) devient :

$$I_T = I_b \left(R_b + \frac{\rho_g}{2} \right) + I_d \frac{1 + \rho_g}{2}$$

Quant aux panneaux photovoltaïques, on utilisera les équations (3.36) et (3.34) pour calculer respectivement l'angle d'incidence du rayonnement direct et le rayonnement solaire total.

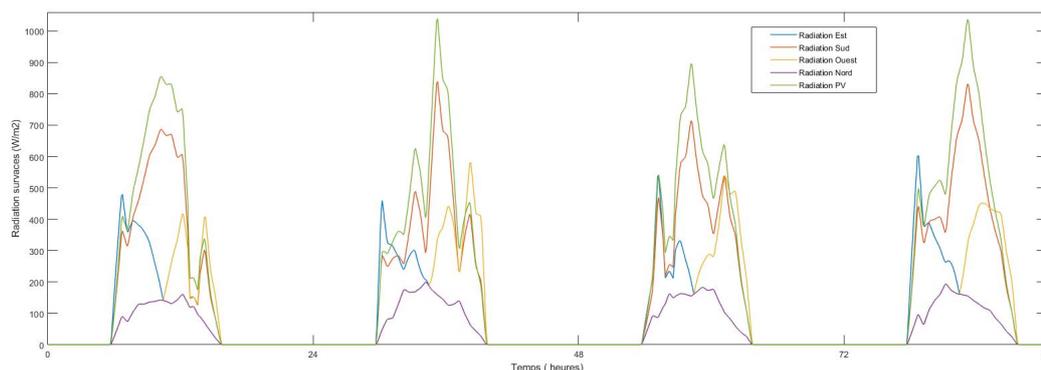


FIGURE 3.21 – Rayonnement solaire total reçu par les différentes surfaces

Une application numérique de ces équations permet d'obtenir le rayonnement solaire total incident sur chaque surface considérée (figure 3.21).

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des modèles reliant les entrées et les sorties de chaque sous système. Ces modèles seront associés pour fournir au contrôleur MPC les prédictions futures dont il a besoin pour le calcul de la séquence de commande optimale. Les valeurs prédites de la vitesse du vent seront appliquées à l'entrée du modèle de l'éolienne pour prédire sa puissance produite. De même le modèle des panneaux photovoltaïques complété par un modèle de prédiction du rayonnement solaire futur incident sur les panneaux permet de prédire la puissance produite par les panneaux photovoltaïques. Les prédictions de la température extérieure et le rayonnement solaire associées au modèle du bâtiment permettront de prédire le besoin en chauffage et par conséquent les prédictions de la puissance demandées par la pompe à chaleur. Et un dernier modèle permet d'estimer l'état de charge des batteries.

L'étape suivante est l'élaboration d'une stratégie de commande optimale à base de ces modèles pour améliorer les performances du système étudié.

Chapitre 4

Commande prédictive MPC

Contents

4.1	Introduction	62
4.2	Principe de fonctionnement	63
4.2.1	Principe de base	63
4.2.2	Éléments de la commande prédictive	64
4.2.2.1	Modèle	64
4.2.2.2	Critère d'optimisation	64
4.2.2.3	Contraintes	65
4.2.2.4	Optimiseur	66
4.3	Formulation de la commande prédictive	66
4.3.1	Formulation de base	66
4.3.1.1	Prédictions	66
4.3.1.2	Fonction de coût et résolution du problème d'optimisation	69
4.3.2	Commande prédictive avec feedforward	71
4.3.3	Commande prédictive avec contraintes :	72
4.3.4	Commande prédictive distribuée	75
4.3.4.1	Principe de la commande prédictive distribuée	76
4.3.4.2	Décomposition du problème d'optimisation	76
4.4	Résultat de simulation	78
4.4.1	Analyse du contrôleur MPC	78
4.4.1.1	Impact des horizons de prédiction	78
4.4.1.2	Impact des poids de pondération	81
4.4.1.3	Impact des incertitudes paramétriques	82
4.4.2	Efficacité du contrôleur MPC	83
4.4.3	Application MPC pour le management d'énergie du micro-réseau	84
4.4.4	Application de la commande prédictive distribuée	87
4.5	Conclusion	91

4.1 Introduction

Les techniques de commande utilisées dans la littérature sont nombreuses, depuis les plus simples jusqu'aux plus sophistiquées élaborées par des méthodes de commande avancée. Parmi les contrôleurs les plus simples, on trouve :

- *Contrôleur de type tout-ou-rien (TOR)* : c'est un régulateur qui élabore une action de commande discontinue qui prend deux positions ou deux états 0 et 1 (Marche/Arrêt). Les régulateurs TOR sont utilisés pour la commande des systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas très importante comme par exemple la régulation d'un four à l'aide d'une résistance chauffante. Le comportement du système contrôlé par un régulateur TOR est caractérisé par des oscillations de la variable contrôlée.

- *Contrôleur PID (proportionnel, intégral, dérivé)* : celui-ci est utilisé pour élaborer une action de commande continue, bien que ces régulateurs améliorent les performances de contrôle, le réglage de ses paramètres (actions Proportionnelle P, Intégrale I ou Dérivée D) est loin d'être trivial et nécessite une procédure efficace. Différentes procédures de réglage ou d'autoréglage ont été proposées. Ce régulateur nécessite un modèle mathématique du processus à commander, ou bien, dans le cas d'un réglage manuel, une connaissance du comportement du système.

Ces deux contrôleurs sont dits 'classiques', et les travaux de recherche se sont orientés vers des structures de commande plus évoluées, dits 'intelligentes' basées sur de l'intelligence artificielle (IA), parmi lesquelles on trouve :

- *Réseaux de neurones artificiels (ANN , Artificial Neural Network)* : ils essaient de copier la structure du neurone biologique. Le neurone est un système de traitement d'information, caractérisé par un nombre très important d'entrées et une seule sortie. Ces réseaux sont souvent employés pour résoudre des problèmes de reconnaissance et de classification. Leur fonctionnement est basé sur des algorithmes d'apprentissage, qui leur fait mémoriser et classer les données. L'inconvénient de la technique réside dans le fait qu'elle a besoin d'un nombre significatif de données pour la procédure d'apprentissage afin de pouvoir offrir des réglages précis du contrôleur.

- *Logique floue* : Cet outil reproduit davantage l'approche qualitative du cerveau humain. Le système flou repose alors sur une connaissance préalable sur le processus. Cette connaissance s'exprime sous la forme d'un ensemble de règles, qui peuvent s'énoncer de manière générale comme : 'à telle situation convient tel action'.

- *Algorithmes génétiques (GA , Genetic Algorithm)* : Cette classe de méthode appartient à la famille des algorithmes évolutionnistes. Les algorithmes génétiques sont une abstraction de la théorie de l'évolution, s'appuyant sur les principes de sélection de Darwin et sur les méthodes de combinaison de gènes. Ces algorithmes fournissent des bonnes performances à de faibles coûts surtout quand le problème d'optimisation possède de nombreuses solutions admissibles.

D'autres structures de commande évoluées, basées sur l'approche de la commande optimale ont été développées, Parmi celles-ci une structure en particulier a suscité beaucoup d'intérêt, il

s'agit de la commande prédictive.

- *Commande prédictive (MPC , Model Predictive Control)* : Cette technique de commande avancée est largement étudiée aussi bien dans le milieu industriel que dans le milieu académique. Elle repose sur un modèle explicite du procédé pour prévoir le comportement futur de la sortie et permet de résoudre des problèmes de commande optimale en ligne, où l'erreur de poursuite, à savoir la différence entre la sortie prévue et la référence désirée, est réduite au minimum sur un horizon futur. Les performances sont évaluées au moyen d'une fonction de coût et la technique permet de prendre en compte des contraintes imposées aux variables du procédé.

C'est cette technique de commande prédictive qui sera développée dans ce chapitre pour la régulation thermique du bâtiment et la gestion d'énergie du micro-grid.

4.2 Principe de fonctionnement

4.2.1 Principe de base

La commande prédictive résulte de la résolution répétée à chaque pas de temps d'un problème de commande optimale : 'comment aller de l'état actuel à un état futur appelé objectif de manière optimale en satisfaisant à des contraintes s'appliquant à la fois aux entrées de commande et aux variables d'état du système'. La figure 4.1 illustre une formulation générale de l'approche utilisée par la commande prédictive :

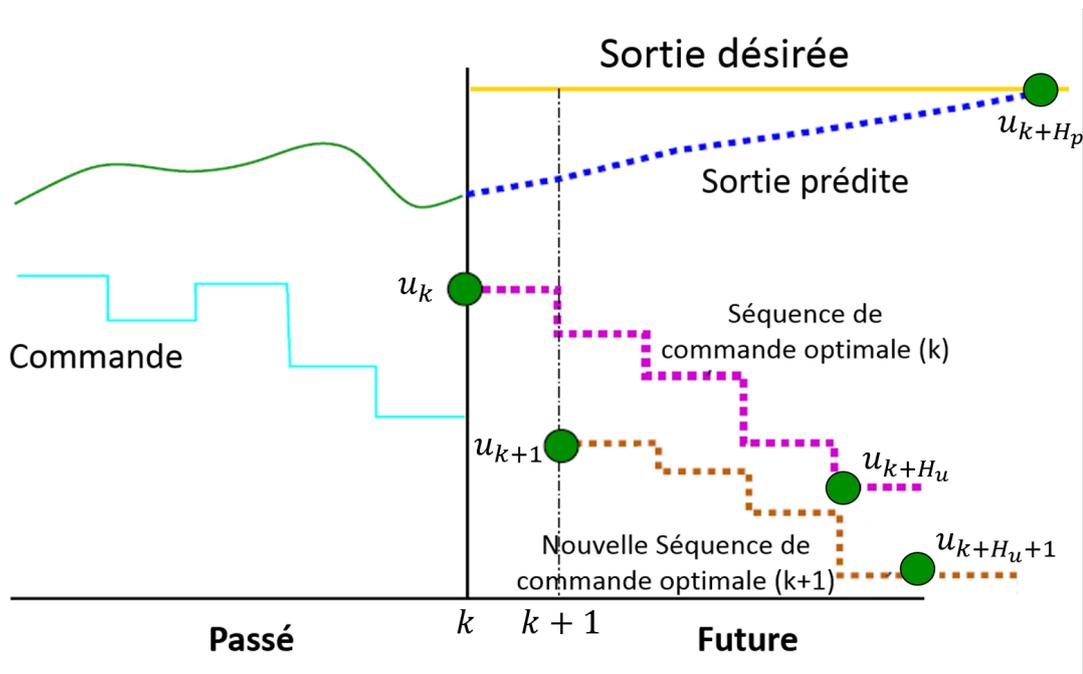


FIGURE 4.1 – Principe du MPC sur un horizon glissant

1. Prédiction de sortie : le contrôleur calcule la sortie prédite ($\hat{y}(k+i|k), i = 0, 1, 2, \dots, H_p$) du procédé sur l'horizon de prédiction H_p en se basant sur le modèle du procédé.
2. Calcul de la séquence de commande : les signaux de commandes futures $u(k+l|k), l = 0, 1, 2, \dots, H_u$ sont déterminés en minimisant la fonction de coût et en respectant les contraintes qui portent sur les commandes et sorties du procédé.
3. Application de la première composante de la séquence de commande : le premier élément de la séquence de commande, i.e. $u(k|k)$ est appliquée au procédé, par contre les autres valeurs de la séquence de commande sont abandonnées.

L'étape 1 est répétée avec des nouvelles mesures connues $y(k+1)$, une nouvelle séquence de commande $u(k+1+l|k+1), l = 0, 1, 2, \dots, H_u$ est élaborée. La mise en œuvre de la technique se fait alors sur un horizon glissant. Les imperfections du modèle sont corrigées avec la réactualisation des erreurs entre les objectifs et les mesures. Le projet de commande est amélioré à chaque échantillon de temps et par conséquent la séquence $u(k+1+l|k+1), l = 0, 1, \dots, H_u - 1$ sera très certainement différente de $u(k+l|k), l = 1, 2, \dots, H_u$.

4.2.2 Éléments de la commande prédictive

L'élaboration de la commande prédictive s'articule autour de quatre points clés :

- Un modèle mathématique du procédé à commander.
- Un critère d'optimisation traduisant l'objectif de fonctionnement souhaité du procédé.
- Des caractéristiques de fonctionnement des actionneurs qui engendrent des contraintes dont le contrôleur doit tenir compte.
- Une méthode de résolution du problème d'optimisation qui permet d'obtenir la commande future à appliquer pour atteindre l'objectif établi.

4.2.2.1 Modèle

Le modèle de prédiction du procédé occupe une place cruciale dans la stratégie de commande prédictive. Il doit être capable de décrire le comportement futur du procédé sous une certaine sollicitation connue de l'entrée. Pratiquement n'importe quel modèle peut être utilisé dans une stratégie de commande MPC (ARX, ARMA, ARMAX, Fonction de transfert, Équations d'état...), (SISO, MIMO...), cependant, si le modèle est non linéaire, le problème d'optimisation qui en découle peut être délicat et peut ne pas converger.

Le modèle linéaire MIMO (multiple input multiple output) sous forme d'équation d'état développé dans le chapitre précédent sera utilisé dans la suite dans sa version discrétisée.

4.2.2.2 Critère d'optimisation

Le critère d'optimisation ou fonction de coût est la traduction mathématique des objectifs de commande du procédé sous les contraintes de fonctionnement. Ce critère est en général défini

comme la somme pondérée d'un terme portant sur les carrés des erreurs de prédiction et d'un terme portant sur les carrés des incréments de commande :

$$J = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{y}(k+i|k) - r(k+i)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=1}^{H_u} \|\Delta u(k+l-1|k)\|_{R(i)}^2 \quad (4.1)$$

où $r(k)$ représente le vecteur des consignes futures supposées connues et $\Delta u(k)$ représente la séquence des incréments de commande optimale à déterminer. Cette fonction de coût contient les éléments de réglage spécifiques à la commande MPC, plusieurs stratégies de choix de ces paramètres existent, [BD96a], [RLM05]. Cependant, il n'existe pas encore de méthode systématique permettant de choisir les paramètres optimaux vis-à-vis du problème posé.

l'horizon supérieur de prédiction sur les sorties $H_p \in \mathbb{N}^*$: Le choix de l'horizon de prédiction H_p joue un rôle important tant par la quantité d'informations fournie à l'algorithme, que du point de vue de la faisabilité numérique du problème d'optimisation. Il semble que pour de nombreux processus, on peut optimiser les performances attendues en boucle fermée en choisissant H_p pour être aussi grand que possible, au moins égal au temps de réponse du procédé.

l'horizon inférieur de prédiction sur les sorties $H_w \in \mathbb{N}^*$: il est généralement égal à 1, mais peut être supérieur à 1, cela signifie que l'erreur dans le régime transitoire n'importe pas. Pour un système à retard, l'horizon inférieur de prédiction sur la sortie peut être choisi égal à la valeur du retard pur.

l'horizon de prédiction sur les commandes $H_u \in \mathbb{N}^*$: Si H_p augmente, les performances nominales sont améliorées si toutefois H_u est suffisamment grand. Pourtant dans la pratique, pour beaucoup de systèmes, une valeur de H_u supérieure à 3 n'apporte pas de différences significatives [Ros03]. on a toujours : $H_u < H_p$ et $\Delta u(k+i|k) = 0, \forall i \geq H_u$

L'expression (4.1) considère les mêmes horizons de prédiction sur toutes les sorties et les mêmes horizons de commande sur toutes les entrées.

les matrices de pondération Q et R : ce sont des matrices diagonales définies positives. L'augmentation des poids Q par rapport aux poids R a pour effet de libérer l'activité de contrôle, la fonction de coût est dominée par l'erreur de poursuite. L'optimisation met donc l'accent sur la réduction des erreurs entre la sortie et la consigne. Dans le cas contraire, l'augmentation des poids R par rapport aux poids Q a pour effet de réduire l'activité de contrôle et conduit à une réponse plus lente du système bouclé. Augmenter R indéfiniment réduira l'activité de contrôle à zéro, ce qui "désactive" l'action de rétroaction. Généralement la pondération sur l'erreur de poursuite Q est considérée comme unitaire, dans ce cas seule la pondération sur l'effort de commande R intervient.

4.2.2.3 Contraintes

Dans tout procédé, le fonctionnement est sujet à des contraintes qui peuvent être d'origines différentes. Les entrées doivent rester dans une zone de fonctionnement des contraintes physiques. Tout actionneur selon la technologie utilisée aura une plage d'utilisation limitée. Les sorties

doivent rester dans une certaine zone de fonctionnement définie par les contraintes d'activité. Elles peuvent être étroitement liées à la sécurité, la stabilité et/ou l'objectif à atteindre en termes de produit final. Ces contraintes sont explicitement prises en compte par le contrôleur pour calculer la séquence de commande.

4.2.2.4 Optimiseur

Un optimiseur ou solveur permet de calculer la séquence de commande future qui minimise la fonction de coût tout en respectant les contraintes. Pour la fonction de coût considérée ci dessus dans l'équation (4.1), ça revient à résoudre un problème d'optimisation quadratique (QP) dont plusieurs solutions standards existent. La plupart des fournisseurs industriels de MPC écrivent leurs propres solveurs. L'approche conventionnelle utilisée pour la résolution de ce problème d'optimisation est la méthode de l'ensemble actif. Celle-ci présente des garanties de convergence et est assez simple à coder ; les limites théoriques du nombre d'itérations pour trouver le minimum sont très importantes mais rarement abordées dans la pratique. Un solveur de QP est disponible sur MATLAB.

4.3 Formulation de la commande prédictive

4.3.1 Formulation de base

La théorie présentée dans cette section qui nous permettra l'élaboration d'un programme MPC est principalement tirée de [Mac02],[JSC⁺18]. Cette théorie avec l'introduction de la section 4.2, ainsi que le principe de l'horizon glissant, peuvent être considérées comme un bref résumé de la théorie sur laquelle repose le contrôleur MPC. Cette section, en plus explique la mise en œuvre du MPC faite dans ce rapport. Afin de rendre la théorie et la mise en œuvre du contrôleur aussi claires que possible, le schéma du contrôleur MPC est d'abord mis en œuvre dans sa version la plus simple, puis des fonctions supplémentaires et des exigences nouvelles en terme de performance sont ensuite introduites.

Le point de départ de la synthèse consiste à définir le modèle du système à étudier.

Considérons pour cela un modèle discret multivariable linéaire invariant dans le temps donné sous forme d'équation d'état discrète :

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\tag{4.2}$$

où x est le vecteur d'état du système de dimension n , y est le vecteur de sortie de dimension m et u est le vecteur d'entrée de dimension p .

4.3.1.1 Prédiction

En effectuant des itérations sur le modèle (4.2), les prédictions des états futurs $\hat{x}(k+i|k)$ sont obtenues en fonction de l'état actuel $x(k)$ et de la séquence des commandes actuelle et futures

$\hat{u}(k+i | k), i = 0, 1, 2, \dots, H_u - 1 :$

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1 | k) &= Ax(k) + B\hat{u}(k | k) \\ \hat{x}(k+2 | k) &= A\hat{x}(k+1 | k) + B\hat{u}(k+1 | k) \\ &= A^2x(k) + AB\hat{u}(k | k) + B\hat{u}(k+1 | k) \\ &\vdots\end{aligned}\tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+H_u | k) &= A^{H_u}x(k) + A^{H_u-1}B\hat{u}(k | k) + A^{H_u-2}B\hat{u}(k+1 | k) + \dots + \\ &\quad AB\hat{u}(k+H_u-2) + B\hat{u}(k+H_u-1 | k) \\ &\vdots \\ \hat{x}(k+H_p | k) &= A^{H_p}x(k) + A^{H_p-1}B\hat{u}(k | k) + A^{H_p-2}B\hat{u}(k+1 | k) + \dots + \\ &\quad A^{H_p-H_u+1}B\hat{u}(k+H_u-2) + (A^{H_p-H_u}B + A^{H_p-H_u-1}B + \dots AB + B)\hat{u}(k+H_u-1 | k)\end{aligned}\tag{4.3}$$

avec :

H_p : L'horizon supérieure de prédiction sur les sorties.

H_u : L'horizon de prédiction sur les commandes.

tel que $H_u \leq H_p$ et $\forall i \geq H_u, \hat{u}(k+i | k) = \hat{u}(k+H_u-1 | k)$.

On a utilisé la notation $\hat{u}(k+i | k)$ et $\hat{x}(k+i | k)$ au lieu de $u(k+i | k)$ et $x(k+i | k)$ parce que à l'instant k les valeurs de $u(k+i | k)$ et $x(k+i | k)$ ne sont pas encore déterminées.

On aura plus tard besoin que les prédictions soient exprimées en termes de $\Delta\hat{u}(k+i | k)$ au lieu de $\hat{u}(k+i | k)$ pour la cohérence avec la fonction de coût. $\Delta\hat{u}(k+i | k)$ est l'incrément de commande, c'est la différence entre deux commandes successives défini par :

$$\Delta\hat{u}(k+i | k) = \hat{u}(k+i | k) - \hat{u}(k+i-1 | k)\tag{4.4}$$

et à chaque pas de temps k on connaît $u(k-1)$. On a alors :

$$\begin{aligned}\hat{u}(k | k) &= u(k-1) + \Delta\hat{u}(k | k) \\ \hat{u}(k+1 | k) &= u(k-1) + \Delta\hat{u}(k | k) + \Delta\hat{u}(k+1 | k) \\ &\vdots \\ \hat{u}(k+H_u-1 | k) &= u(k-1) + \Delta\hat{u}(k | k) + \Delta\hat{u}(k+1 | k) + \dots + \Delta\hat{u}(k+H_u-1 | k)\end{aligned}\tag{4.5}$$

les équations (4.3) deviennent :

$$\begin{aligned}
 \hat{x}(k+1 | k) &= Ax(k) + Bu(k-1) + B\Delta\hat{u}(k | k) \\
 \hat{x}(k+2 | k) &= A^2x(k) + ABu(k-1) + AB\Delta\hat{u}(k | k) + Bu(k-1) + B\Delta\hat{u}(k | k) + B\Delta\hat{u}(k+1 | k) \\
 \hat{x}(k+2 | k) &= A^2x(k) + ABu(k-1) + AB\Delta\hat{u}(k | k) + Bu(k-1) + B\Delta\hat{u}(k | k) + B\Delta\hat{u}(k+1 | k) \\
 &= A^2x(k) + (AB+B)u(k-1) + (AB+B)\Delta\hat{u}(k | k) + B\Delta\hat{u}(k+1) \\
 &\vdots \\
 \hat{x}(k+H_u | k) &= A^{H_u}x(k) + (A^{H_u-1}B + A^{H_u-2}B + \dots + AB + B)u(k-1) + (A^{H_u-1}B + A^{H_u-2}B \\
 &\quad + \dots + AB + B)\Delta\hat{u}(k | k) + (A^{H_u-2}B + A^{H_u-3}B + \dots + AB + B)\Delta\hat{u}(k+1) \\
 &\quad + (AB+B)\Delta\hat{u}(k+H_u-2) + B\Delta\hat{u}(k+H_u-1) \\
 &\vdots \\
 \hat{x}(k+H_P | k) &= A^{H_P}x(k) + \sum_{i=0}^{H_P-1} A^i Bu(k-1) + \sum_{i=0}^{H_P-1} A^i B\Delta\hat{u}(k | k) + \sum_{i=0}^{H_P-2} A^i B\Delta\hat{u}(k+1) \\
 &\quad + \dots + \sum_{i=0}^{H_P-H_u} A^i B\Delta\hat{u}(k+H_u-1 | k)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Ces équations peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1 | k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_u | k) \\ \hat{x}(k+H_u+1 | k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_P | k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^{H_u+1} \\ \vdots \\ A^{H_P} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B \\ AB+B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_P-1} A^i B \end{bmatrix} u(k-1) \\
 &+ \begin{bmatrix} B & 0 \dots & 0 \\ AB+B & B \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots B \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B & \sum_{i=0}^{H_u-2} A^i B \dots & AB+B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_P-1} A^i B & \sum_{i=0}^{H_P-2} A^i B \dots & \sum_{i=0}^{H_P-H_u} A^i B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k | k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k+H_u-1) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

avec :

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(k+1 | k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+H_P | k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1 | k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_P | k) \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

les prédictions des sorties s'expriment :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+H_u|k) \\ \hat{y}(k+H_u+1|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+H_P|k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{H_u} \\ CA^{H_u+1} \\ \vdots \\ CA^{H_P} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} CB \\ CAB+CB \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} CA^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_P-1} CA^i B \end{bmatrix} u(k-1) \\
 &+ \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & \vdots & & & \\ CAB+CB & CB & 0 & 0 & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} CA^i B & \sum_{i=0}^{H_u-2} CA^i B & \cdot & CB & \\ \vdots & \vdots & & \dots & CAB+CB \\ \sum_{i=0}^{H_P-1} CA^i B & \sum_{i=0}^{H_P-2} CA^i B & \cdot & \sum_{i=0}^{H_P-H_u} CA^i B & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k+H_u-1|k) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

qui peut finalement se mettre sous la forme compacte suivante :

$$Y(k) = \Psi x(k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta U(k) \tag{4.10}$$

Définissons l'erreur :

$$\varepsilon(k) = \tau(k) - \Psi x(k) - \Upsilon u(k-1) \tag{4.11}$$

où :

$$\tau(k) = \begin{bmatrix} r(k+H_w|k) \\ \vdots \\ r(k+H_P|k) \end{bmatrix} \text{ est le vecteur consigne, référence supposée connue.}$$

H_w : L'horizon inférieure de prédiction sur les sorties.

Cela peut être considéré comme une "erreur de suivi", dans le sens qu'il s'agit de la différence entre la future consigne désirée $\tau(k)$ et la "réponse libre" du système, à savoir la réponse qui se produirait sur l'horizon de prédiction si aucune modification n'était apportée aux valeurs de commande, c'est-à-dire, si nous fixons $\Delta U(k) = 0$. Et si $\varepsilon(k)$ était vraiment 0, alors il serait effectivement correct de fixer $\Delta U(k) = 0$.

4.3.1.2 Fonction de coût et résolution du problème d'optimisation

Considérons la fonction de coût suivante :

$$J(k) = \sum_{i=H_w}^{H_P} \|\hat{y}(k+i|k) - r(k+i)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta\hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2 \tag{4.12}$$

Ce critère peut être mis sous la forme suivante :

$$j(k) = \|Y(k) - \tau(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \quad (4.13)$$

tel que :

$$Y(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}(k + H_w | k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k + H_P | k) \end{bmatrix}, \tau(k) = \begin{bmatrix} \hat{r}(k + H_w | k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k + H_P | k) \end{bmatrix}, \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k | k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k + H_u - 1 | k) \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q(H_w) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q(H_w + 1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q(H_P) \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R(0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R(1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R(H_u - 1) \end{bmatrix}$$

On a donc :

$$\begin{aligned} j(k) &= \|\Theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \\ &= [\Delta U(k)^T \Theta^T - \varepsilon(k)^T] Q [\Theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)] + \Delta U(k)^T R \Delta U(k) \\ &= \varepsilon(k)^T Q \varepsilon(k) - 2 \Delta U(k)^T \Theta^T Q \varepsilon(k) + \Delta U(k)^T [\Theta^T Q \Theta + R] \Delta U(k) \\ &= \text{const} - \Delta U(k)^T g + \Delta U(k)^T H \Delta U(k) \end{aligned} \quad (4.14)$$

tel que : $g = 2\Theta^T Q \varepsilon(k)$ et $H = \Theta^T Q \Theta + R$

Pour trouver la séquence de commande qui minimise la fonction de coût $j(k)$, on calcule son gradient :

$$\nabla_{\Delta U(k)} j(k) = -g + 2H \Delta U(k) \quad (4.15)$$

En mettant le gradient de $j(k)$ égal à zéro, on obtient les valeurs optimales :

$$\Delta U(k)_{opt} = \frac{1}{2} H^{-1} g \quad (4.16)$$

et on ne retient que la première commande :

$$\begin{aligned} \Delta u(k)_{opt} &= [I_{n_u}, O_{n_u}, \cdots, O_{n_u}] \Delta U(k)_{opt} \\ &= [I_{n_u}, O_{n_u}, \cdots, O_{n_u}] \left(\frac{1}{2} H^{-1} g \right) \\ &= [I_{n_u}, O_{n_u}, \cdots, O_{n_u}] \left(\frac{1}{2} H^{-1} \right) (2\Theta^T Q \varepsilon(k)) \\ &= [I_{n_u}, O_{n_u}, \cdots, O_{n_u}] H^{-1} \Theta^T Q \varepsilon(k) \end{aligned} \quad (4.17)$$

On pose :

$$K_{mpc} = [I_{n_u}, O_{n_u}, \cdots, O_{n_u}] H^{-1} \Theta^T Q \quad (4.18)$$

et donc :

$$\Delta u(k)_{opt} = K_{mpc} \varepsilon(k) \quad (4.19)$$

on note que nous pouvons maintenant écrire $\Delta u(k)_{opt}$, plutôt que $\Delta \hat{u}(k)_{opt}$, car nous avons maintenant trouvé la solution et c'est l'entrée qui sera réellement appliquée au système à l'instant k .

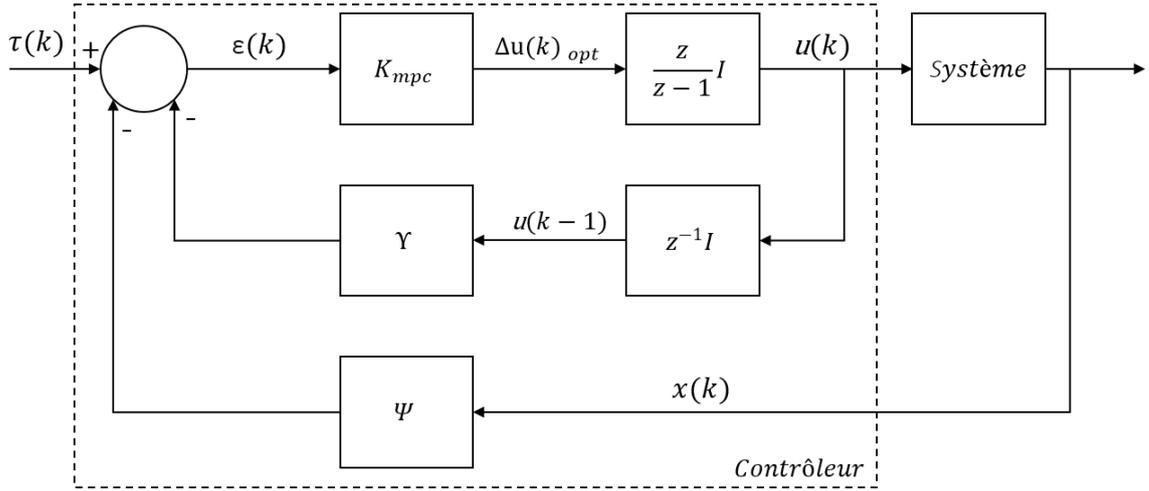


FIGURE 4.2 – structure du contrôleur MPC

La figure 4.2 résume la structure et le fonctionnement de la loi de commande prédictive développée ci-dessus. A chaque pas de temps :

- L'erreur de l'équation (4.11) est calculée.
- L'incrément de commande $\Delta u(k)_{opt}$ est calculé par l'équation (4.19).
- La commande $u(k)$ calculée par l'équation (4.4) est appliquée sur le système.
- les matrices à coefficients réels A, B, C qui sont respectivement les matrices d'état, de commande et d'observation représentant le système multivariable sont utilisées pour le calcul des matrices Ψ , Υ et Φ .

4.3.2 Commande prédictive avec feedforward

Quand une perturbation peut être anticipée alors elle peut être rejetée par la commande, c'est ce que l'on appelle le feedforward control, ce dernier est plus efficace que le feedback control qui attend que la perturbation affecte le système et réagit pour corriger l'erreur. Le feedforward peut être incorporé facilement dans la commande prédictive, il suffit d'inclure l'effet de la perturbation sur la sortie future prédite. L'algorithme prend ces perturbations en compte lors du calcul du signal de commande à appliquer sur le système. Pour illustrer ceci, considérons le système :

$$\begin{aligned} x(k+1 | k) &= Ax(k | k) + Bu(k) + B_d d_m(k) \\ y(k | k) &= Cx(k | k) \end{aligned} \quad (4.20)$$

d_m est le vecteur d'entrée des perturbations mesurables de dimension n_d .

Dans ce cas :

$$Y(k) = \Psi x(k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta U(k) + \Xi D_m(k) \quad (4.21)$$

tel que :

$$D_m(k) = \begin{bmatrix} d_m(k) \\ \hat{d}_m(k+1 | k) \\ \vdots \\ \hat{d}_m(k+H_P-1 | k) \end{bmatrix}, \Xi = \begin{bmatrix} CB_d & 0 & \cdots & 0 \\ CAB_d & CB_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{H_P-1}B_d & CA^{H_P-2}B_d & \cdots & CB_d \end{bmatrix}$$

Ici la valeur $d_m(k)$ de la perturbation à l'instant k est mesurée, les autres valeurs futures $\hat{d}_m(k+i | k)$ sont prédites. Les matrices Ψ, Υ et Φ restent les mêmes.

La définition de l'erreur sera modifiée :

$$\varepsilon(k) = T(k) - \Psi x(k | k) - \Upsilon u(k-1) - \Xi D_m(k) \quad (4.22)$$

Après avoir appliquées ces modifications la suite de l'algorithme reste la même.

4.3.3 Commande prédictive avec contraintes :

Dans la pratique le MPC est utilisé en considérant des contraintes sur les entrées et les sorties, selon [Mac02] ces contraintes peuvent être mises sous la forme :

$$E \begin{bmatrix} \Delta U(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (4.23)$$

$$F \begin{bmatrix} U(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (4.24)$$

$$G \begin{bmatrix} Y(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (4.25)$$

tel que : $U(k) = \begin{bmatrix} \hat{u}(k | k) \\ \vdots \\ \hat{u}(k+H_u-1 | k) \end{bmatrix}$ est défini de manière analogue à $\Delta U(k)$.

il faut exprimer l'ensemble des contraintes en fonction de $\Delta U(k)$ car elle est la variable du problème d'optimisation que l'on cherche à déterminer.

Supposons que F s'exprime sous la forme :

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_{H_u}, f] \quad (4.26)$$

donc l'équation (4.24) peut s'écrire :

$$\sum_{i=1}^{H_u} F_i \hat{u}(k+i-1 | k) + f \leq 0 \quad (4.27)$$

Or, avec :

$$\hat{u}(k+i-1 | k) = u(k-1) + \sum_{j=0}^{i-1} \Delta \hat{u}(k+j | k) \quad (4.28)$$

l'équation (4.27) devient :

$$\sum_{j=1}^{H_u} F_j \Delta \hat{u}(k | k) + \sum_{j=2}^{H_u} F_j \Delta \hat{u}(k+1 | k) + \dots + F_{H_u} \Delta \hat{u}(k+H_u-1 | k) + \sum_{j=1}^{H_u} F_j u(k-1) + f \leq 0 \quad (4.28)$$

et si l'on définit :

$$\mathcal{F}_i = \sum_{j=i}^{H_u} F_j \quad (4.29)$$

et

$$\mathcal{F} = [\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_{H_u}] \quad (4.30)$$

alors l'équation (4.24) peut s'écrire sous la forme :

$$\mathcal{F} \Delta U(k) \leq -\mathcal{F}_1 u(k-1) - f \quad (4.31)$$

où le membre de droite de l'inégalité est un vecteur, qui est connu à l'instant k . Nous avons donc converti (4.24) en une inégalité linéaire de contraintes sur $\Delta U(k)$.

Nous devons maintenant faire la même chose pour l'équation (4.25), nous avons déjà fait la plupart du travail nécessaire dans ce cas. Nous pouvons utiliser l'équation (4.10) (ou 4.21 dans le cas de perturbations mesurables) pour réécrire (4.25) :

$$G \begin{bmatrix} \Psi x(k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta U(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (4.32)$$

Posons :

$$G = [\Gamma, g] \quad (4.33)$$

tel que : g est la dernière colonne de G , on a donc :

$$\Gamma [\Psi x(k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta U(k) + g] \leq 0 \quad (4.34)$$

alors il vient :

$$\Gamma \Theta \Delta U(k) \leq -\Gamma [\Psi x(k) + \Upsilon u(k-1)] - g \quad (4.35)$$

et si :

$$E = [W, w] \quad (4.36)$$

de la même façon (4.23) peut s'écrire sous la forme :

$$W \Delta U(k) \leq w \quad (4.37)$$

En rassemblant les trois inégalités (4.31),(4.35) et (4.37) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \mathcal{F} \\ \Gamma \Theta \\ W \end{bmatrix} \Delta U(k) \leq \begin{bmatrix} -\mathcal{F}_1 u(k-1) - f \\ -\Gamma [\Psi x(k) + \Upsilon u(k-1)] - g \\ w \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

En considérant la même fonction de coût (4.12), il reste donc à résoudre le problème d'optimisation :

$$\text{Minimiser } \Delta U(k)^T H \Delta U(k) - g^T \Delta U(k)$$

sous les contraintes

$$\begin{bmatrix} \mathcal{F} \\ \Gamma \Theta \\ W \end{bmatrix} \Delta U(k) \leq \begin{bmatrix} -\mathcal{F}_1 u(k-1) - f \\ -\Gamma [\Psi x(k) + \Upsilon u(k-1)] - g \\ w \end{bmatrix}$$

Ce problème prend la forme :

$$\begin{aligned} & \min_{\Theta} \frac{1}{2} \Theta^T \Phi \Theta + \phi^T \Theta \\ & \text{Subject to } \Omega \Theta \leq \omega \end{aligned}$$

qui est un problème d'optimisation quadratique appelé **Quadratic Programming Problem (QP)**, dont il existe des algorithmes standards pour sa résolution, par exemple la méthode de "l'ensemble actif" [BD96b].

4.3.4 Commande prédictive distribuée

Pour les systèmes complexe, l'utilisation d'un seul contrôleur qui gère le système globale d'une manière centralisée comme illustré sur la figure 4.3 peut être trop coûteuse (voire impossible) d'un point de vue calculatoire surtout pour les bâtiments de grandes dimensions avec un grand nombre de zones. En outre ceci conduit à une architecture non modulaire qui est généralement inappropriée pour des raisons de maintenance et de sécurité, mais aussi d'adaptabilité et d'extensibilité.

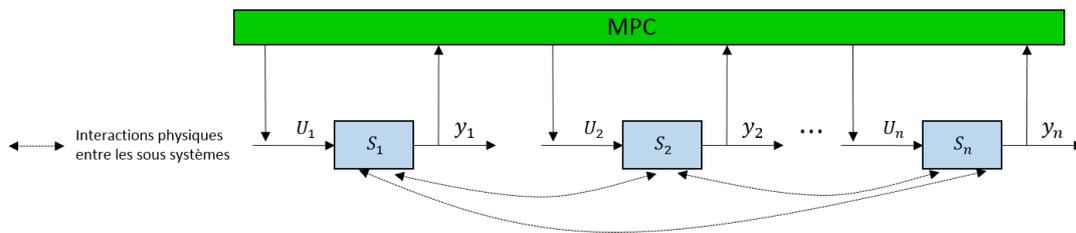


FIGURE 4.3 – Architecture de commande centralisée

Ces points faibles ont conduit au développement d'une stratégie décentralisée (figure 4.4) où le système global est décomposé en un ensemble de sous système auquel est associé un contrôleur local fonctionnant indépendamment des autres. Cette stratégie permet de surmonter les problèmes de l'approche centralisée mais ne résout pas tout le problème du fait que les interactions entre les sous systèmes sont considérées comme des perturbations généralement faibles et qui peuvent être négligées.

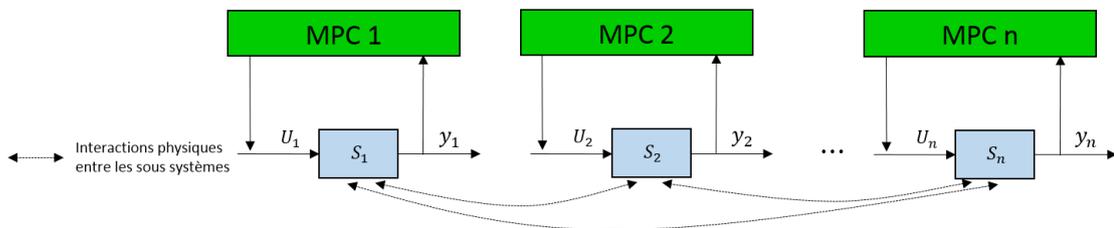


FIGURE 4.4 – Architecture de commande décentralisée

Une autre solution alternative est l'approche distribuée (figure 4.5) qui en plus de la décomposition du système permet aux contrôleurs d'échanger des informations afin que chacun d'entre eux ait des connaissances sur le comportement des autres.

La décomposition d'un système est généralement le résultat d'une analyse structurelle et fonctionnelle du système, avec comme point de départ le système complet et comme aboutissement les parties élémentaires. Plusieurs approches de décomposition d'un système sont proposées dans la littérature mais ne sont pas traitées dans ce rapport. Le système étudié dans ce rapport peut être divisé naturellement selon une décomposition horizontale en 3 sous systèmes micro-réseau, pompe à chaleur et bâtiment comme l'illustre la figure 4.6.

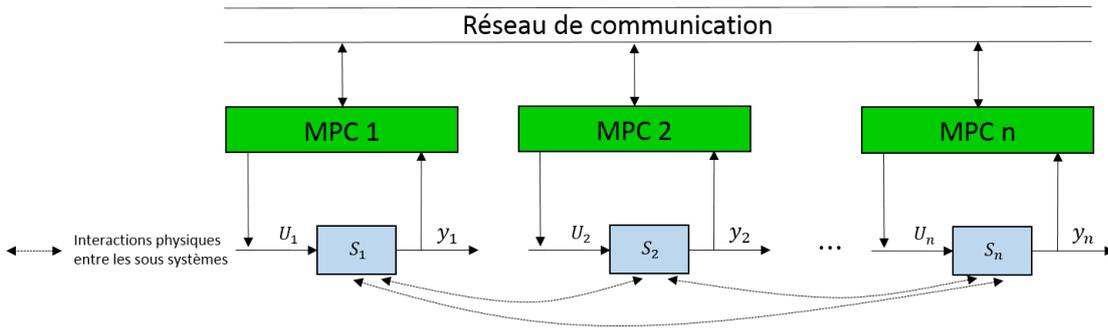


FIGURE 4.5 – Architecture de commande distribuée

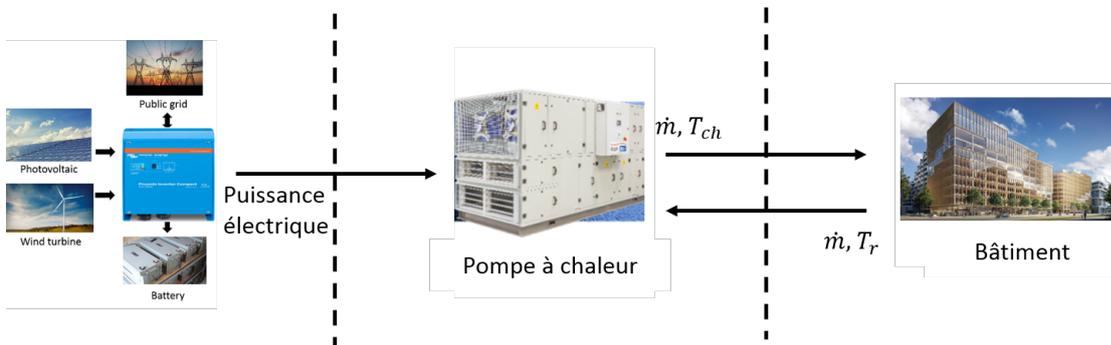


FIGURE 4.6 – Décomposition du système globale en sous système

Dans ce système, la pompe à chaleur puise l'énergie électrique du micro-réseau (Production) pour satisfaire le besoin (Demande) en chaleur du bâtiment.

4.3.4.1 Principe de la commande prédictive distribuée

Le principe de la commande prédictive distribuée (DMPC) consiste à décomposer le système global en un ensemble de sous systèmes, ensuite on associe à chaque sous-système S_i , un sous-contrôleur C_i (appelé également agent local), et un algorithme MPC est implanté dans chaque contrôleur C_i , en utilisant les informations locales acquises sur le sous-système S_i et en évaluant les interactions entre S_i et les autres sous-systèmes $S_j, j = 1, 2, \dots, N$ avec $j \neq i$. Il est alors nécessaire d'assurer un échange et un certain niveau de coordination entre les contrôleurs afin d'obtenir une bonne performance à l'échelle du système global, ce qui est précisément l'objectif de la DMPC. Ainsi le problème d'optimisation centralisé est divisé en plusieurs sous-problèmes d'optimisation [VLK09],[VRW05].

4.3.4.2 Décomposition du problème d'optimisation

Tout d'abord, commençons par la décomposition du système : le modèle global (4.42),(4.43) représenté dans l'espace d'état, peut être décomposé en N sous-système S_i avec $x_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{x_i}}$,

$u_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{u_i}}$ et $y_i(k) \in \mathbb{R}^{n_{y_i}}$ comme vecteurs d'états, d'entrées et de sorties respectivement.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ \vdots \\ x_N(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N1} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N1} & \cdots & B_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_N(k) \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k+1) \\ \vdots \\ y_N(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N1} & \cdots & C_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_N(k) \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Par conséquent, chaque sous-système S_i peut être décrit par un modèle d'état :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N B_{ij}u_j(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N C_{ij}x_j(k) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4.42)$$

ou encore sous forme compacte :

$$S_i \triangleq \begin{cases} x_i(k+1) = A_{ii}x_i(k) + B_{ii}u_i(k) + w_i(k) \\ y_i(k) = C_{ii}x_i(k) + v_i(k) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4.43)$$

On définit ensuite les vecteurs d'interaction par les grandeurs :

$$\begin{aligned} w_i(k) &\triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N A_{ij}x_j(k) + \sum_{j=1; j \neq i}^N B_{ij}u_j(k) \\ v_i(k) &\triangleq \sum_{j=1; j \neq i}^N C_{ij}x_j(k) \end{aligned} \quad (4.44)$$

Pour le système S_i ces grandeurs d'interaction regroupent tous les termes produits par les autres sous-systèmes $S_j (j \neq i)$ et sont considérés comme des entrées de perturbations mesurables.

Enfin, on associe à chaque sous système S_i un contrôleur C_i dont la fonction de coût est :

$$J_i(k) = \sum_{l=H_w}^{H_P} \|\hat{y}_i(k+l|k) - r_i(k+l)\|_{Q_i(l)}^2 + \sum_{l=0}^{H_u-1} \|\Delta \hat{u}_i(k+i|k)\|_{R_i(l)}^2 \quad (4.45)$$

L'algorithme de l'élaboration de loi de commande pour le contrôleur C_i est décrit comme suit :

Algorithme d'optimisation du contrôleur C_i

1. initialisation de k , i.e, $k = 1$;
 - 2 : acquérir le vecteur des états prédits \hat{x}_j et le vecteur de la séquence de commande optimale \hat{u}_j envoyés par les autres sous contrôleurs C_j .
 - 3 : acquérir les états actuels x_i et le vecteur des sorties désirées r_i .
 - 4 : calculer la séquence de la commande optimale sur l'horizon H_u , et ensuite envoyer cette séquence aux sous contrôleurs C_j .
 - 5 : appliquer le premier élément de la séquence optimale $u_i(k|k)$ sur le sous-système local S_i
 6. calculer le vecteur des états prédits \hat{x}_i sur l'horizon H_p et puis l'envoyer aux autres sous contrôleurs C_j .
 - 7 : incrémenter l'instant de temps $k \leftarrow k + 1$ et aller à l'étape 2.
-

4.4 Résultat de simulation

4.4.1 Analyse du contrôleur MPC

Dans cette section, certains résultats de simulation concernant une seule zone du bâtiment sont fournis pour illustrer les principales caractéristiques du contrôleur proposé.

On considère le modèle du bâtiment à une seule zone :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + B_d d \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4.46)$$

$x = [T_z]$ - l'état du système.

$y = [T_z]$ - la sortie du système.

$u = [T_{ch}]$ - l'entrée de commande.

$d = [T_{ext} \ Ie \ Iw \ Is \ In \ N]^T$ - le vecteur des entrées non commandables mais mesurables.

$$A = \left[-\frac{1}{M}\dot{m} - \frac{1}{MCR} \right], \quad B = \left[\frac{1}{M}\dot{m} \right]$$

$$B_d = \left[\frac{1}{MCR} \quad \frac{Sfe}{MC} \quad \frac{Sfw}{MC} \quad \frac{Sfs}{MC} \quad \frac{Sfn}{MC} \quad \frac{Q}{MC} \right], \quad C = [1]$$

où, pour simplifier l'analyse, seule la température extérieure est variable, les autres perturbations mesurables étant supposées constantes. La fonction de coût s'écrit :

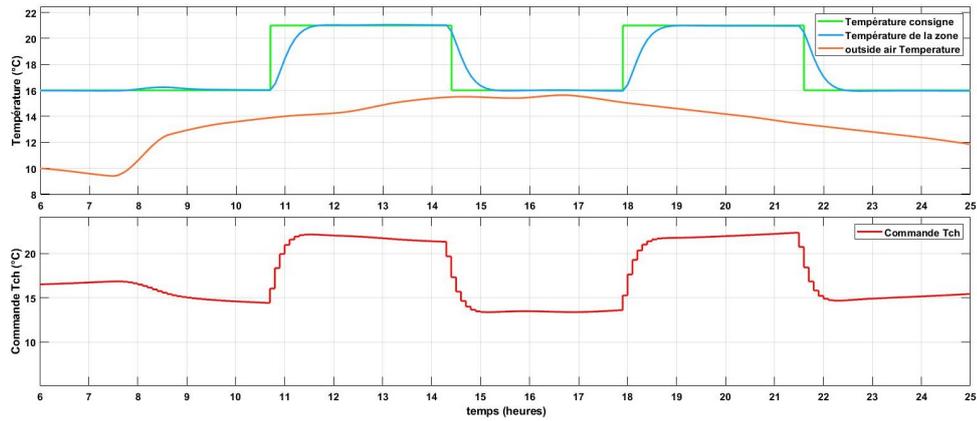
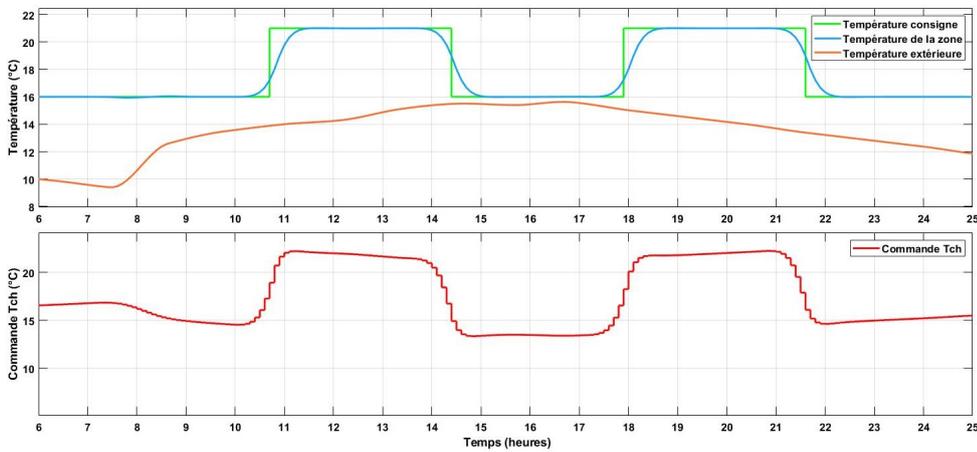
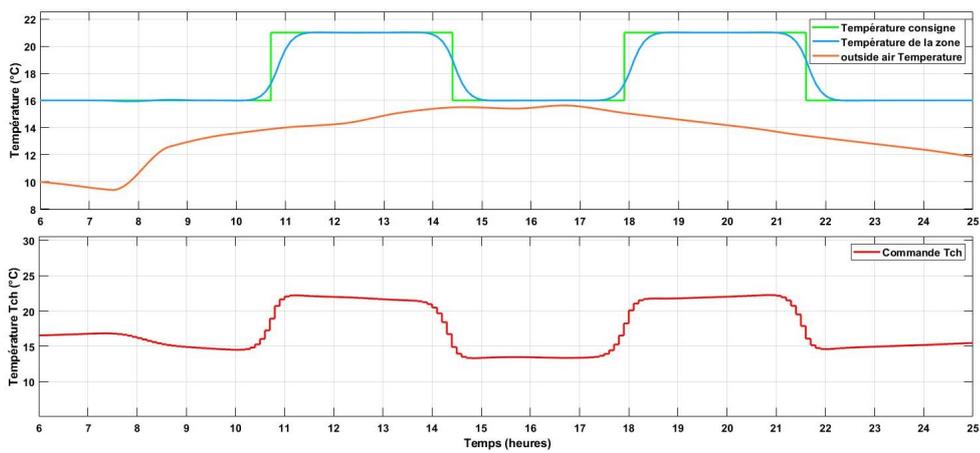
$$J(k) = \sum_{i=H_w}^{H_P} \left\| \hat{T}_z(k+i|k) - T_r(k+i) \right\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \left\| \Delta \hat{T}_{ch}(k+i|k) \right\|_{R(i)}^2 \quad (4.47)$$

avec :

T_r : la température de consigne.

4.4.1.1 Impact des horizons de prédiction

Étudions maintenant l'impact de l'horizon de prédiction sur les performances du système sachant qu'un pas de prédiction est égal à 0.1 heure :

FIGURE 4.7 – Influence de l’horizon de prédiction $H_p = 2$ (12 min)FIGURE 4.8 – Influence de l’horizon de prédiction $H_p = 10$ (1 heure)FIGURE 4.9 – Influence de l’horizon de prédiction $H_p = 50$ (5 heures)

on voit que pour un horizon de prédiction petit $H_p = 2$ (12 min) (figure 4.7), le contrôleur n’a pas de visibilité sur le futur et perd son effet anticipatif. A l’instant $t = 8$ la température dans

la zone s'éloigne de la consigne à cause du changement de la température extérieure avant que cette erreur ne soit corrigée.

Plus l'horizon est grand, meilleures sont les performances ; en effet pour $H_p = 10$ (1 heure), le contrôleur envoie un signal de commande qui fait face au changement de la température extérieure et la déviation de la consigne est évitée comme il est montré sur la figure 4.8, en plus le contrôleur commence à agir avant le changement de la consigne. Toutefois à partir d'un horizon de prédiction $H_p = 10$ aucune amélioration n'est obtenue, le résultat pour $H_p = 50$ (5 heures) montré sur la figure 4.9 est le même que pour $H_p = 10$.

Cette conclusion montre que les performances du contrôleur prédictif sont d'autant meilleures que l'horizon de prédiction est important. Cependant, cela suppose que la précision de la prédiction reste acceptable alors qu'il est inévitable que pour un horizon de prédiction trop grand, la précision des données futures prédites diminue et les performances du contrôleur sont altérées ; en effet le contrôleur utilisant un horizon de prédiction $H_p = 10$ (1 heure) dont le résultat est illustré à la figure 4.10 est plus performant que le contrôleur utilisant un horizon de prédiction $H_p = 50$ (5 heures) dont le résultat est montré sur la figure 4.11.

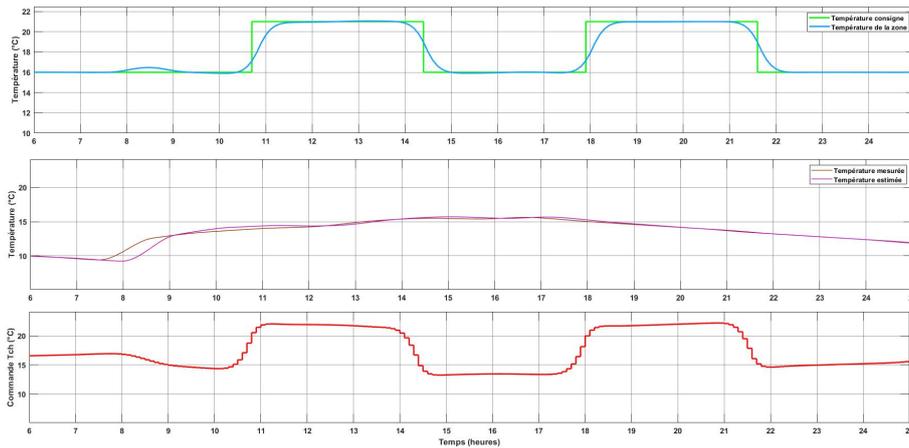


FIGURE 4.10 – Influence de l'horizon de prédiction $H_p = 10$ (1 heure)

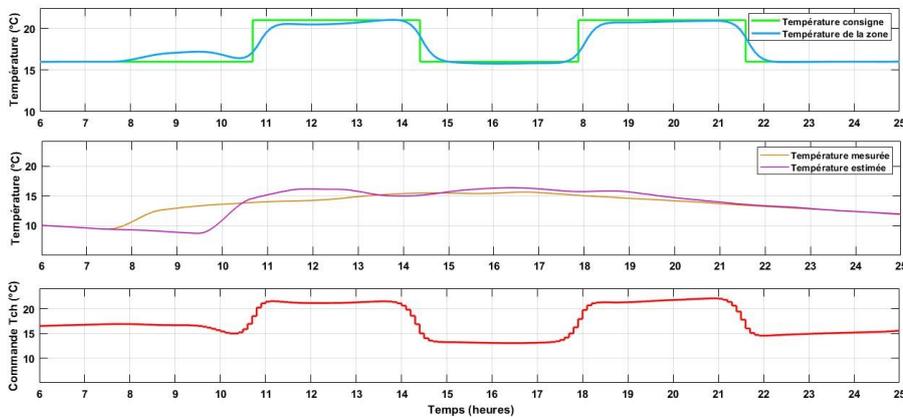


FIGURE 4.11 – Influence de l'horizon de prédiction $H_p = 50$ (5 heures)

4.4.1.2 Impact des poids de pondération

Quant aux matrices de pondération des termes du critère, dans le cas d'un chauffage contrôlé par la température de l'air soufflé dans la zone T_{ch} , un compromis est réalisé avec $Q = R$ (figure 4.12).

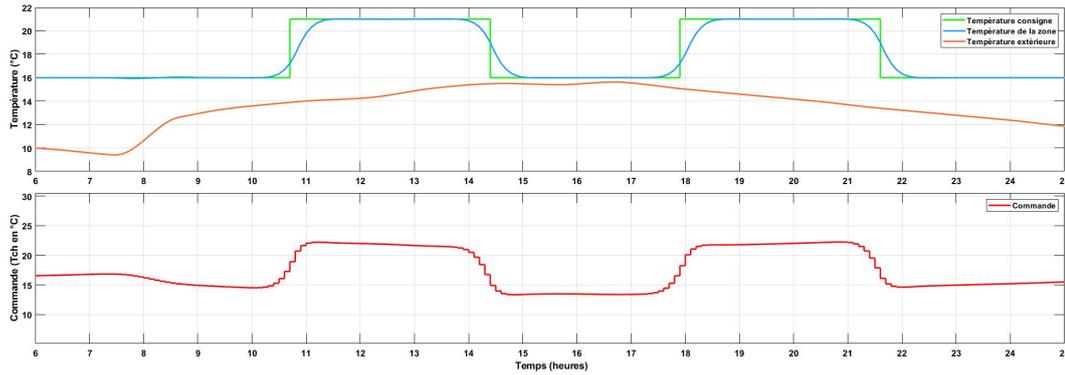


FIGURE 4.12 – Influence des Poids de pondération $Q = R$

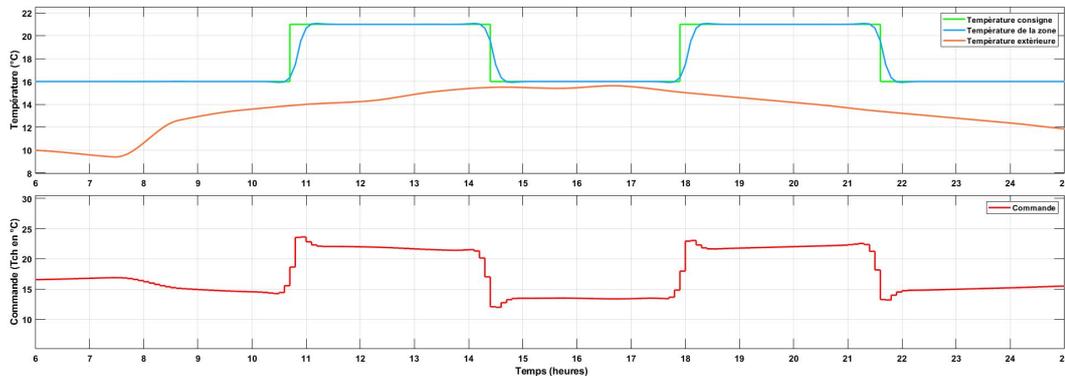


FIGURE 4.13 – Influence des Poids de pondération $Q \gg R$

pour $Q \gg R$ (figure 4.13), minimiser l'erreur entre la sortie et la consigne est prioritaire, la température dans la zone suit le maximum possible la consigne, le signal de commande est libéré, et de grandes variations de la commande sont possibles. En revanche pour $Q \ll R$ (figure 4.14), seules des petites variations de la commande sont possibles, le signal de commande est lissé, et l'erreur de poursuite est grande.

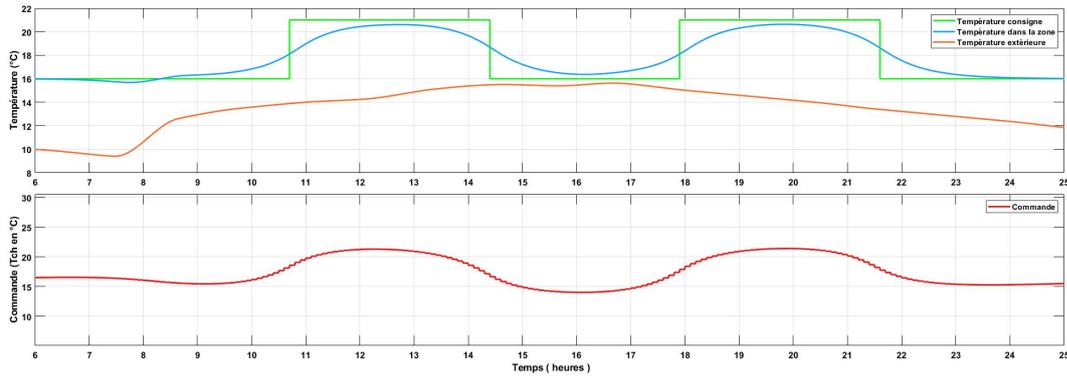


FIGURE 4.14 – Influence des Poids de pondération $Q \ll R$

4.4.1.3 Impact des incertitudes paramétriques

Dans la formulation du MPC (section 4.3), on a vu que le modèle du procédé utilisé au sein du contrôleur occupe une place cruciale, et la capacité du modèle à prédire le comportement du processus est un facteur important.

Dans cette section on réalise deux simulations, dont le modèle utilisé par le contrôleur est différent du modèle du système. Le modèle du bâtiment mono-zone utilisé par le contrôleur est caractérisé par les paramètres du tableau 3.3.

Dans la première simulation on applique le contrôleur à un bâtiment avec une conductivité thermique des murs égale à 0.05 W/m.k au lieu de 0.038 W/m.k et une épaisseur des murs égale à 0.15 m au lieu de 0.2 m , ce qui signifie que le bâtiment réel est bien moins isolé que le bâtiment considéré par le contrôleur. Les résultats de simulation illustrés à la figure 4.15, montrent que la température dans la zone est légèrement inférieure à la température désirée.

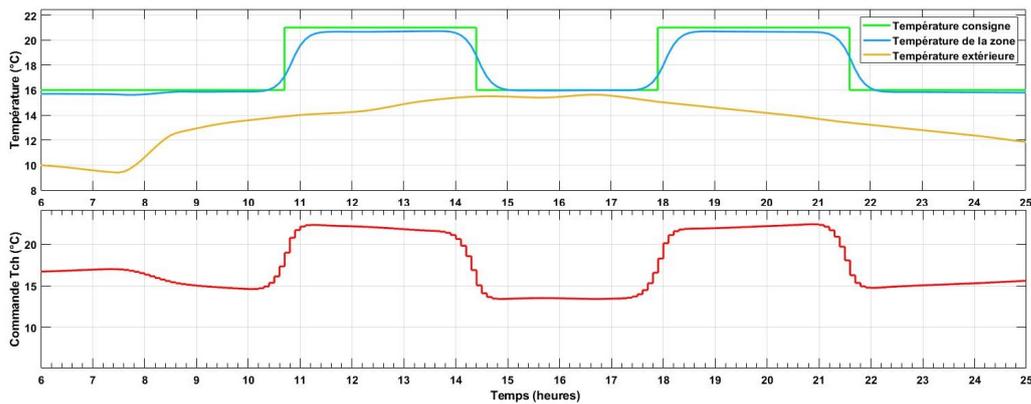


FIGURE 4.15 – Isolation surestimée

Dans la deuxième simulation on applique le contrôleur à un bâtiment avec une conductivité thermique des murs égale à 0.028 W/m.k au lieu de 0.038 W/m.k et une épaisseur des murs égale à 0.25 m au lieu de 0.2 m , ce qui signifie que le bâtiment réel est beaucoup plus isolé que le bâtiment considéré par le contrôleur. Les résultats de simulation illustrés à la figure 4.16, montrent que la température dans la zone est légèrement supérieure à la température désirée.

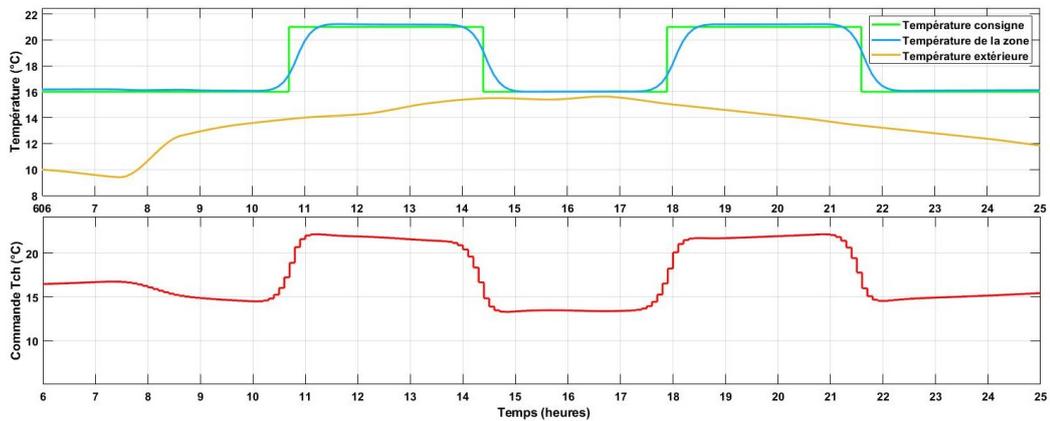


FIGURE 4.16 – Isolation sous estimée

On peut déduire de ces simulations que les incertitudes dynamiques du modèle sont bien compensées par l'action de la commande, grâce à l'effet de rétroaction du contrôleur et le procédé. De plus, ces incertitudes sont assimilées à des défauts ayant un impact limité sur les performances du système ce qui confère au MPC une tolérance implicite aux défauts.

4.4.2 Efficacité du contrôleur MPC

Les résultats de simulation pour la régulation thermique du bâtiment avec un contrôleur MPC et avec un régulateur PID sont comparés à la figure 4.17.

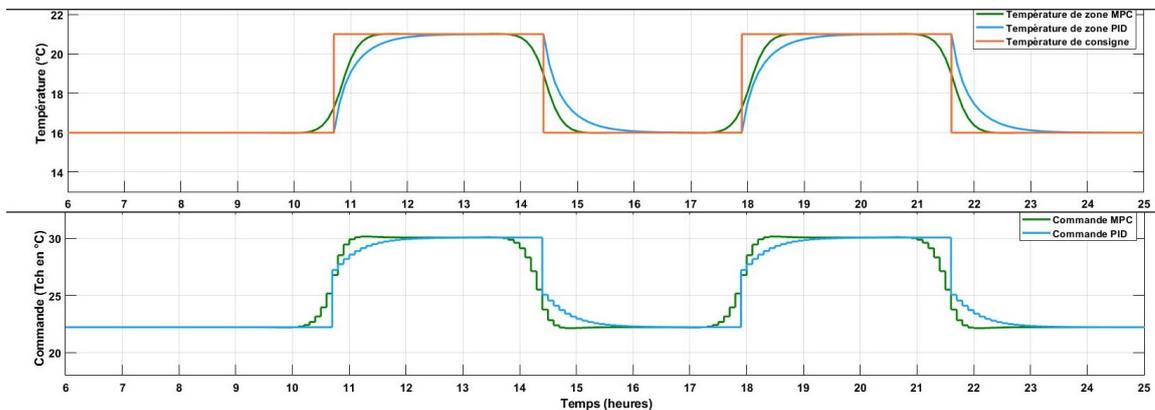


FIGURE 4.17 – Comparaison MPC VS PID

Pour vérifier l'efficacité de la loi de commande MPC et la comparer à la commande PID, nous introduisons deux indicateurs de performance. Ces deux indicateurs traduisent le confort des occupants et l'énergie consommée.

Le premier indicateur, I_c , représente le confort thermique dans le bâtiment. Notons cependant que le confort thermique est généralement basé sur le ressenti des occupants. Pourtant les critères connus sous l'appellation de Vote Moyen Prévisible (PMV – Predicted Mean Vote) et Pourcen-

tage Prévisible d'Insatisfaits (PPD - Percentage of Persons Dissatisfied) [Fan73] nécessitent la mesure d'autres variables qui ne sont pas contrôlées par le poste de chauffage considéré. Par conséquent, l'indice de confort que nous avons choisi mesure la qualité de la régulation du point de vue du suivi de consigne en [$^{\circ}\text{Ch}$].

$$\sum_{k=k_0}^{k_f} |y(k) - r(k)| \Delta t \quad (4.48)$$

dont k_0 et k_f définissent l'instant initial et final de l'intervalle de simulation. Δt est la période d'échantillonnage du système.

Le deuxième indicateur, I_e , décrit la consommation énergétique du poste de chauffage, en [Wh], pendant la période de simulation considérée :

$$\sum_{k=k_0}^{k_f} \frac{\dot{m}c(T_{ch}(k) - T_{ext}(k))}{3600 \cdot COP} \Delta t \quad (4.49)$$

Ce critère correspond à l'énergie consommée par la pompe à chaleur.

Le Tableau 4.1 montre les résultats des deux indicateurs de performance sur une durée de simulation de 24 heures :

	I_c [$^{\circ}\text{Ch}$]	I_e [Wh]
PID	11.15	41666
MPC	10.82	41500
MPC 1	11.15	41416
MPC 2	7.6	41666

TABLE 4.1 – Comparaison MPC VS PID

D'après les résultats de simulation tableau 4.1 les indicateurs I_c et I_e du contrôleur MPC sont plus inférieurs que ceux du contrôleur PID, ce qui signifie que le contrôleur MPC assure un confort meilleur tout en consommant moins d'énergie que le régulateur PID.

4.4.3 Application MPC pour le management d'énergie du micro-réseau

Dans cette section, nous étudions l'application du contrôleur MPC pour le problème de la gestion de l'énergie ; ceci a été étudié dans plusieurs travaux sur différents systèmes et avec différentes formulations de contrôleur MPC [THOM17], [RBH⁺17], [ZBS⁺17], [KKS⁺17], [LWS15], [DMO⁺12]. Dans ce rapport le micro-réseau est composé d'un système de production renouvelable (photovoltaïque et éolienne), d'un système de stockage de l'énergie (batteries) et d'une charge représentée par la demande du système de chauffage du bâtiment. Le système est également connecté au réseau public (figure 4.18).

Le modèle du système de gestion d'énergie est :

$$SoC(k+1) = SoC(k) + \begin{bmatrix} \Delta t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_b(k) \\ P_g(k) \end{bmatrix}$$

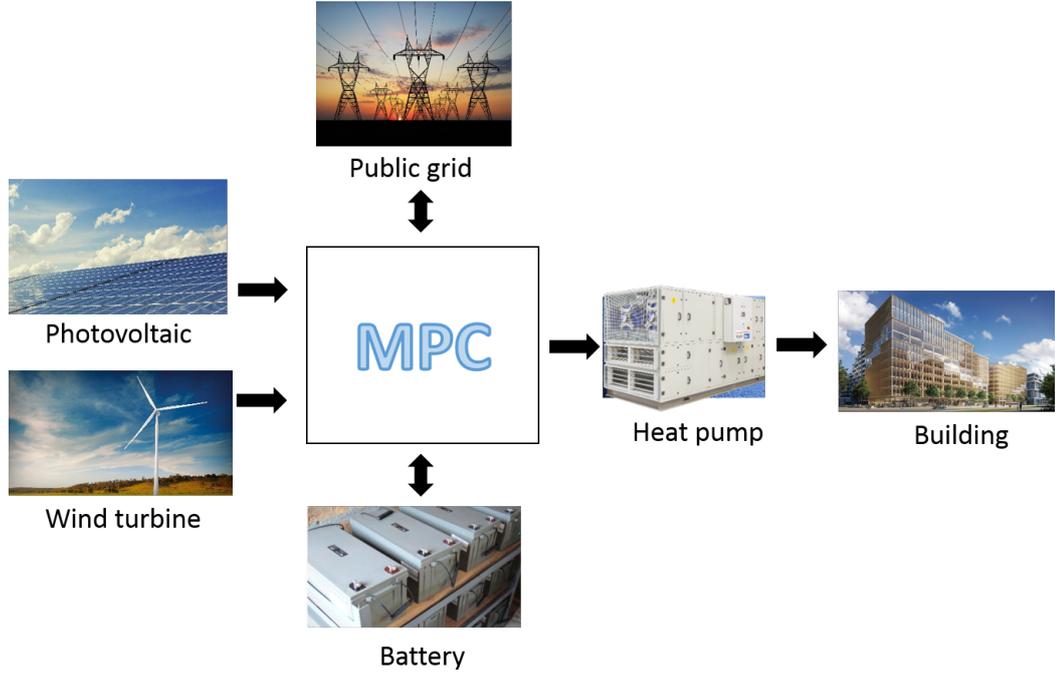


FIGURE 4.18 – Système de gestion d'énergie

$$\begin{bmatrix} SoC(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} SoC(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_b(k) \\ P_g(k) \end{bmatrix}$$

où :

La variable d'état du système est SoC , l'état de charge des batteries en (Wh).

Les commandes sont P_b la puissance échangée avec les batteries et P_g la puissance échangée avec le réseau public en (W).

Le système présente deux sorties SoC et y_2 définie comme la somme des deux puissances P_b et P_g .

Δt est la période d'échantillonnage.

La fonction de coût est :

$$J = \alpha \sum_{i=1}^{H_p} (P_b(i) + P_g(i) + P_{pv}(i) + P_{wt}(i) - P_l(i))^2 + \beta_1 \sum_{i=0}^{H_u} (P_b(i))^2 + \beta_2 \sum_{i=0}^{H_u} (P_g(i))^2$$

P_{pv} : la puissance produite par les panneaux photovoltaïques.

P_{wt} : la puissance produite par l'éolienne.

P_l : la puissance demandée par la charge.

α , β_1 et β_2 sont les pondérations des différents termes du critère.

L'objectif est de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie tout en minimisant l'énergie consommée du réseau public. On considère aussi les contraintes :

- $\underline{P_b} \leq P_b \leq \overline{P_b}$
- $\underline{SoC} \leq SoC \leq \overline{SoC}$

Ce problème d'optimisation peut se mettre sous la forme canonique :

$$J(k) = \sum_{i=H_w}^{H_P} \|\hat{y}(k+i | k) - \hat{r}(k+i)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|u(k+i | k)\|_{R(i)}^2 \quad (4.49)$$

avec :

- $\underline{u_1} \leq u_1 \leq \overline{u_1}$
- $\underline{y_1} \leq y_1 \leq \overline{y_1}$

La comparaison du MPC sera faite avec un contrôleur basé sur un algorithme heuristique généralement utilisé pour la gestion d'énergie.

Algorithme heuristique de gestion d'énergie

- $P_{diff} \Leftarrow$ Puissance Produite ($P_{pv} + P_w$) - Puissance demandée (P_l)

- Si ($P_{diff} > 0$ et $SoC < \overline{SoC}$ ou ($P_{diff} \leq 0$ $SoC > \underline{SoC}$)

$$P_b \Leftarrow P_{diff}$$

$$P_g \Leftarrow 0$$

sinon

$$P_b \Leftarrow 0$$

$$P_g \Leftarrow P_{diff}$$

fin

Les résultats de simulation du contrôleur MPC et heuristique sont respectivement montrés sur les figures 4.19 et 4.20.

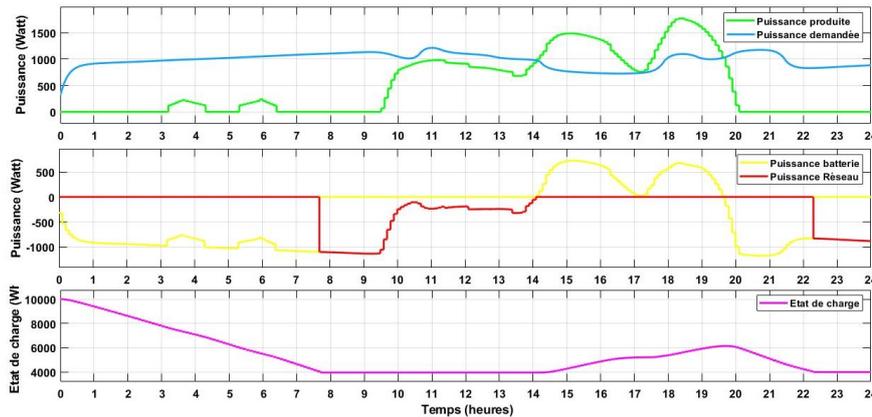


FIGURE 4.19 – Résultat du contrôleur heuristique pour la gestion d'énergie

Pour vérifier l'efficacité du contrôleur MPC, on définit un indicateur de performance mesurant

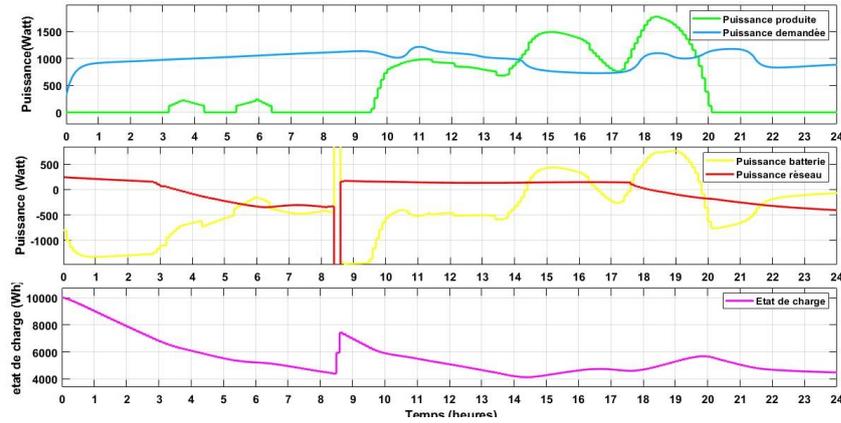
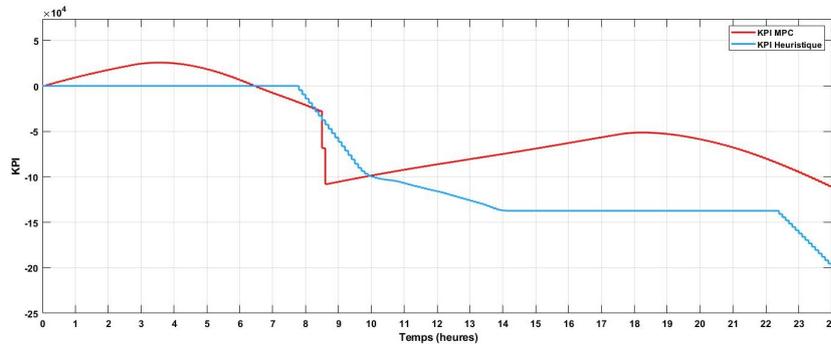


FIGURE 4.20 – Résultat du contrôleur MPC pour la gestion d'énergie

l'échange du micro réseau avec le réseau électrique publique :

$$I_r = \sum_{k=k_0}^{k_f} P_g(k)\Delta t \quad (4.49)$$

La figure 4.21 montre l'évolution de cet indicateur pour les deux contrôleurs. Grâce au MPC, le système consomme moins d'énergie du réseau électrique publique. Le micro-réseau est plus autonome avec un contrôleur MPC qu'avec l'algorithme heuristique.

FIGURE 4.21 – Évolution de l'indicateur de performance I_r

4.4.4 Application de la commande prédictive distribuée

Dans les travaux de recherche, la problématique liée à la régulation de température du bâtiment et la problématique liée à la gestion d'énergie d'un micro réseau intégré au bâtiment sont traitées séparément, alors que ces deux sous systèmes constituent des entités d'un seul système qu'il faut traiter dans sa globalité.

Pour cette application on considère le bâtiment à une seule zone décrit par le modèle (3.26), la pompe à chaleur représentée par le modèle (3.15) et le micro-réseau développé dans la section

(4.4.3).

On commence par le développement de l'approche centralisée où le modèle du système global comprenant tous ces éléments peut être écrit sous la forme :

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_d d(k) \quad (4.50)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (4.51)$$

avec :

$$\begin{aligned} x &= [T_z \quad T_{ch} \quad SoC]^T \\ u &= [S \quad P_b \quad P_g]^T \\ d &= [T_{ext} \quad I_e \quad I_w \quad I_s \quad I_n \quad N]^T \\ y &= [T_z \quad SoC \quad P_s]^T \end{aligned}$$

sont respectivement l'état, le signal de commande (entrées contrôlables), les perturbations mesurées (entrées non contrôlables) et la sortie du modèle centralisé. P_s est défini comme suit :

$$P_s(k) = P_b(k) + P_g(k) + P_l(k) \quad (4.52)$$

Tel que P_l est la puissance demandée par la pompe à chaleur, sa valeur est proportionnelle au signal de commande de son compresseur S :

$$P_l(k) = KS(k) \quad (4.53)$$

La fonction de coût du problème d'optimisation centralisé est :

$$\begin{aligned} J &= \alpha_1 \sum_{i=1}^{H_p} (T_z(i) - T_{sp}(i))^2 + \alpha_2 \sum_{i=1}^{H_p} ((P_b(i) + P_g(i) + P_l(i)) - (P_{pw}(i) + P_{wt}(i)))^2 \\ &+ \beta_1 \sum_{i=0}^{H_u} (P_b(i))^2 + \beta_2 \sum_{i=0}^{H_u} (P_g(i))^2 + \beta_3 \sum_{i=0}^{H_u} (P_l(i))^2 \end{aligned} \quad (4.54)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ and β_3 sont des poids de pondération.

L'objectif est de minimiser l'erreur entre la température dans la zone T_z et la température de consigne T_{sp} , minimiser la puissance demandée par la pompe à chaleur P_l et de maintenir l'équilibre entre les flux de puissance tout en minimisant l'échange avec le réseau public et favoriser l'utilisation des batteries, et en considérant les contraintes suivantes :

$$\underline{S} \leq S \leq \bar{S} \quad (4.55)$$

$$P_b \leq P_b \leq \bar{P}_b \quad (4.56)$$

$$\underline{SoC} \leq SoC \leq \overline{SoC} \quad (4.57)$$

Pour l'approche distribuée, le système sera décomposé en deux sous systèmes :

- le premier sous système comprend le bâtiment à une seule zone et la pompe à chaleur.
- le deuxième sous système est le micro réseau.

Le modèle du premier sous système peut être écrit sous la forme :

$$x_c(k+1) = A_c x_c(k) + B_c u_c(k) + B_{dc} d_c(k) \quad (4.58)$$

$$y_c(k) = C_c x_c(k) \quad (4.59)$$

avec :

$$\begin{aligned} x_c &= [T_z \quad T_{ch}]^T \\ u_c &= [S] \\ d_c &= [T_{ext} \quad I_e \quad I_w \quad I_s \quad I_n \quad N]^T \\ y_c &= [T_z] \end{aligned}$$

et la fonction de coût est :

$$J = \alpha_1 \sum_{i=1}^{H_p} (T_z(i) - T_{sp}(i))^2 + \alpha_2 \sum_{i=0}^{H_u} (S(i))^2 \quad (4.59)$$

L'objectif est de minimiser l'erreur entre la température dans la zone T_z et la température de consigne T_{sp} , minimiser la puissance demandée par la pompe à chaleur représentée par S et en considérant la contrainte suivante :

$$\underline{S} \leq S \leq \bar{S} \quad (4.60)$$

Le modèle du deuxième sous système présenté dans la section (4.4.3) s'écrit sous la forme :

$$x_r(k+1) = A_r x_r(k) + B_r u_r(k) \quad (4.61)$$

$$y_r(k) = C_r x_r(k) + D_r u_r(k) \quad (4.62)$$

avec :

$$\begin{aligned} x_r &= [SoC] \\ u_r &= [P_b \quad P_g] \\ y_r &= [SoC \quad y_2] \end{aligned}$$

Et dont la fonction de coût est :

$$J = \alpha \sum_{i=1}^{H_p} (P_b(i) + P_g(i) + P_{pv}(i) + P_{wt}(i) - P_l(i))^2 + \beta_1 \sum_{i=0}^{H_u} (P_b(i))^2 + \beta_2 \sum_{i=0}^{H_u} (P_g(i))^2$$

L'objectif est de maintenir l'équilibre entre les flux de puissance tout en minimisant l'échange avec le réseau public et favoriser l'utilisation des batteries, et en considérant les contraintes

suivantes :

$$P_b \leq P_b \leq \overline{P_b} \quad (4.63)$$

$$\underline{SoC} \leq SoC \leq \overline{SoC} \quad (4.64)$$

A chaque pas de temps l'algorithme présenté dans la section (4.3.4.2) est exécuté par chaque contrôleur. Les résultats obtenus par les deux approches centralisées et distribuées présentées dans les figures 4.22 et 4.23 montrent que la commande prédictive distribuée pourrait avoir les mêmes performances que la commande prédictive centralisée, cependant l'approche distribuée permet d'avoir un système modulaire, facilement extensible et plus approprié pour des raisons de maintenances et de sécurité.

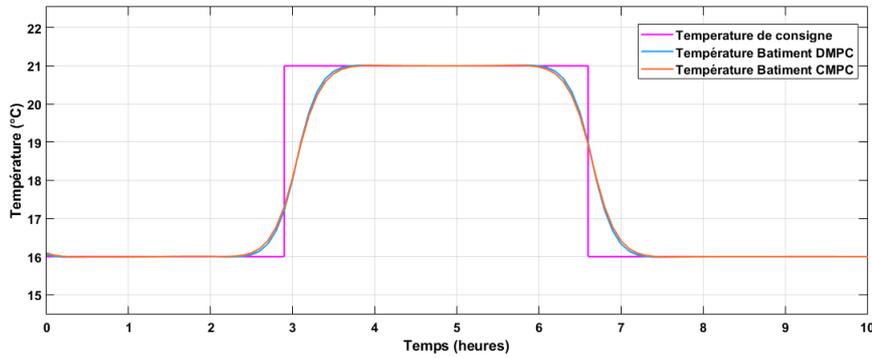


FIGURE 4.22 – Régulation température du bâtiment

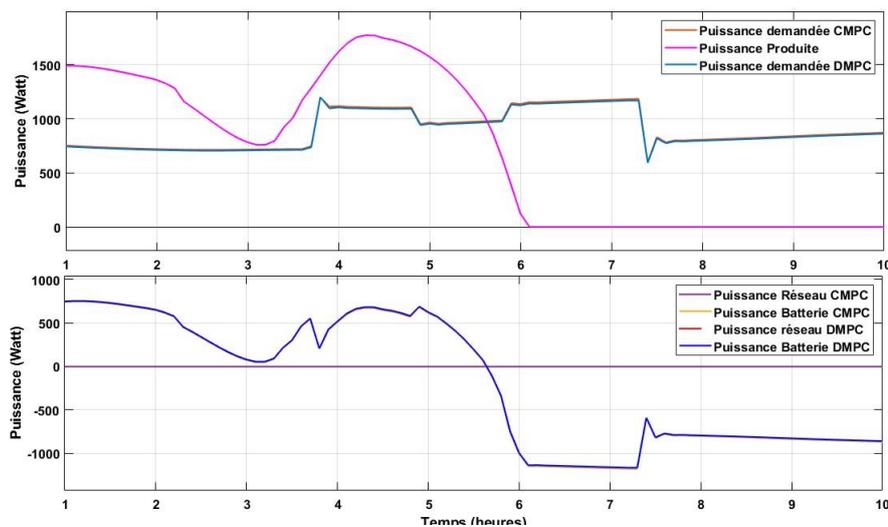


FIGURE 4.23 – Gestion d'énergie

Une autre version de la commande prédictive distribuée a été réalisée mais cette fois ci appliquée au modèle linéarisé du bâtiment à 3 zones.

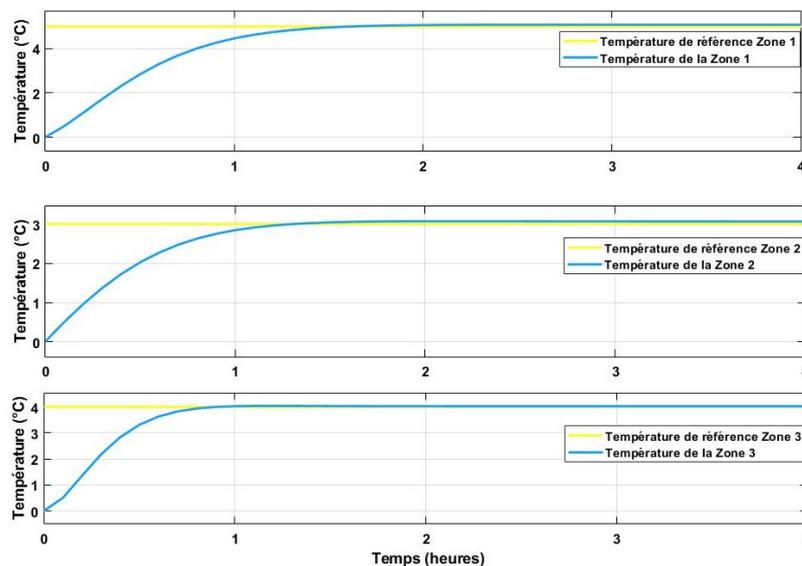


FIGURE 4.24 – DMPC pour régulation température du bâtiment

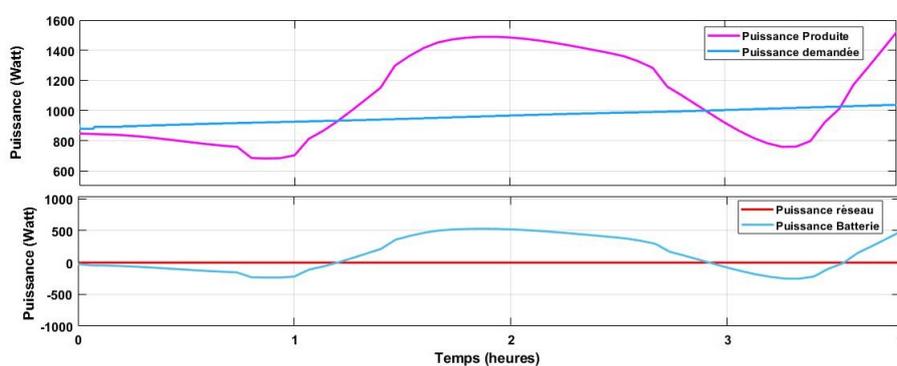


FIGURE 4.25 – DMPC pour gestion d'énergie

Les résultats de simulation sont montrés sur la figure 4.24 pour la régulation thermique du bâtiment avec 3 zones, et sur la figure 4.25 pour la gestion des flux de puissance du micro-réseau. La convergence du problème d'optimisation est assurée et la solution optimale globale est obtenue.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le principe de fonctionnement de la commande prédictive a tout d'abord été expliqué, puis la formulation du MPC sous forme d'un problème d'optimisation quadratique a

été développée, ensuite un contrôleur MPC a été appliqué au système étudié, d'une part pour la régulation de température du bâtiment et d'autre part pour la gestion d'énergie du micro-réseau, enfin une approche de commande prédictive distribuée a été développée et appliquée à un bâtiment multi-zones.

Il a été montré que le MPC présente des résultats meilleurs que des stratégies de commande classiques, il reste à savoir si le MPC est aussi performant en cas de présence de défaut.

Le chapitre suivant présentera le diagnostic de défauts et le MPC en tant que commande tolérante aux défauts.

Chapitre 5

Diagnostic de défauts et commande tolérante aux défauts

Contents

5.1	Introduction	95
5.2	Concepts fondamentaux du diagnostic de défauts et de la commande tolérante aux défauts	95
5.2.1	Définitions générales	95
5.2.2	Classification des défauts	95
5.2.3	Modélisation des défauts	97
5.2.4	Diagnostic de défauts FDI	99
5.2.5	Synthèse d'observateurs pour le diagnostic	100
5.2.5.1	Observabilité	100
5.2.5.2	Observateur de Luenberger	100
5.2.5.3	Filtre de Kalman	101
5.2.6	Commande tolérante aux défauts FTC	103
5.2.6.1	Méthodes passives PFTC	104
5.2.6.2	Méthodes actives AFTC	105
5.2.7	Analyse du système global FDI/FTC	107
5.3	Contributions au diagnostic de défauts et à la commande tolérante aux défauts	109
5.3.1	Approche linéaire	109
5.3.1.1	Conception de filtres isolateurs de défauts	109
5.3.1.2	Reconfiguration du contrôle	111
5.3.2	Approches bi-linéaires	112
5.3.2.1	Conception d'observateurs bilinéaires	112
5.3.2.2	Structuration des résidus pour l'isolation des défauts de capteurs	114
5.3.2.3	Structuration des résidus pour l'isolation des défauts d'actionneurs	117
5.3.2.4	Reconfiguration du contrôle	118
5.4	Application au système à énergie renouvelable	120
5.4.1	Application du filtre linéaire à un bâtiment multizone	121
5.4.2	Application de l'observateur bilinéaire à un bâtiment multizone	123
5.4.2.1	Diagnostic défaut capteur	124

5.4.2.2	Diagnostic défaut actionneur	125
5.4.2.3	Compensation des défauts actionneur	126
5.4.3	Défaut capteur de température du bâtiment	129
5.4.4	Défaut actionneur pompe à chaleur	130
5.4.5	Défaut procédé batteries de stockage	132
5.5	Conclusion	133

5.1 Introduction

En raison de l'exigence croissante de fiabilité et de sécurité des systèmes industriels, il est primordial de détecter et d'identifier le plus tôt possible tout type d'anomalies et de défauts potentiels, afin de mettre en œuvre un fonctionnement tolérant aux défauts qui minimise la dégradation des performances et évite les situations dangereuses. De nombreuses méthodes, comme nous allons le voir, ont été proposées dans la littérature.

A cette fin, nous présentons tout d'abord un état de l'art sur le diagnostic de défauts et la commande tolérante aux défauts dans les systèmes dynamiques en expliquant les notions, les méthodes et les outils cités dans la littérature. Ensuite nous appliquons ces outils sur le système bâtiment en considérant tout d'abord une approche linéaire puis ensuite une approche bi-linéaire.

5.2 Concepts fondamentaux du diagnostic de défauts et de la commande tolérante aux défauts

5.2.1 Définitions générales

Nous présentons dans cette section quelques définitions et concepts généraux dans le domaine du diagnostic [IB97].

- **Défaut** : est défini comme une déviation des paramètres du système par rapport à ses valeurs nominales.
- **Défaillance** : est un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou de panne.
- **Détérioration** : est une perte de performance altérant partiellement le fonctionnement du système.
- **Panne** : est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.
- **Fonctionnement normal** : un système est en fonctionnement normal lorsque ses paramètres sont très proches de leur valeur nominale.
- **Système de surveillance** : La surveillance est une tâche continue, réalisée en temps réel, de détermination de l'état d'un système physique. Le système de surveillance doit détecter rapidement l'occurrence d'un défaut et le discriminer d'autres phénomènes : perturbations, bruits, incertitudes. La fonction de surveillance fait intervenir les techniques de génération de résidus et de diagnostic de défauts.

5.2.2 Classification des défauts

Les défauts peuvent être différenciés selon leur évolution dans le temps (figure 5.1), on distingue ainsi trois types de défauts :

- **Défaut brusque (a)** : il est caractérisé par un passage brutale du système de l'état de fonctionnement normal à l'état de fonctionnement anormal.

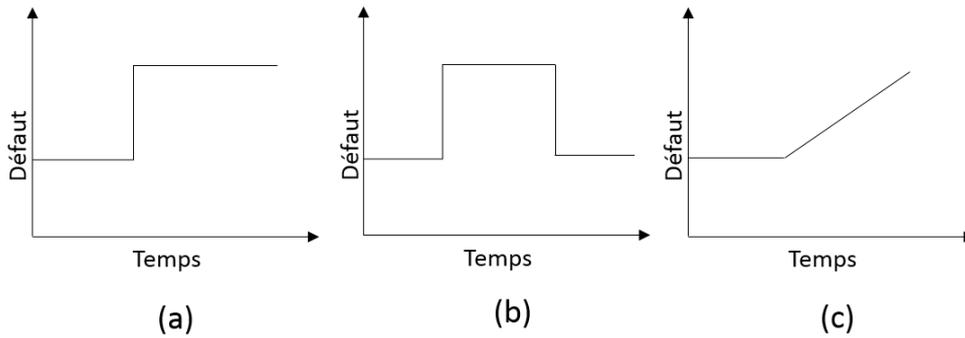


FIGURE 5.1 – Evolution temporelle des défauts

- **Défaut intermittent (b)** : il apparaît et disparaît de manière répétée, où il est difficile de savoir s’il s’agit d’un défaut ou d’une perturbation.
- **Défaut graduel (c)** : son impact sur le système est faible au début et devient de grand ampleur avec le temps.

Les défauts peuvent aussi être classés selon l’élément touché par le défaut (figure 5.2), on distingue ainsi trois types de défauts :

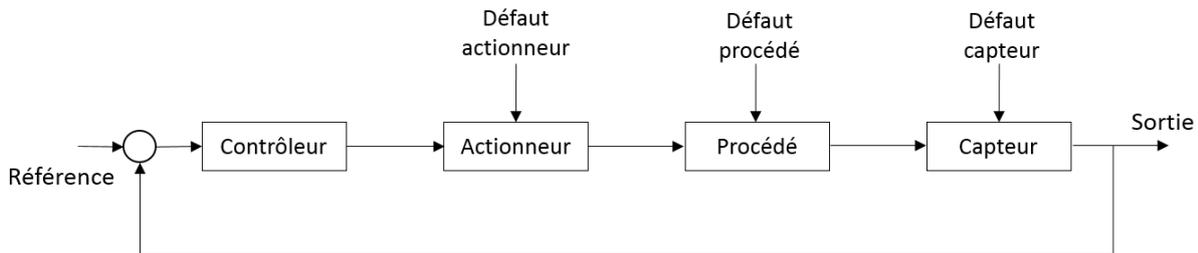


FIGURE 5.2 – Différents types de défauts affectant un système physique

- **Défaut actionneur** : représente une perte totale ou partielle d’une action de commande d’un actionneur agissant sur le système. Un blocage d’un actionneur est un exemple de défaut actionneur qui se produit souvent.
- **Défaut capteur** : représente une altération de l’information fournie par le capteur sur l’état physique du système. Ceci se caractérise par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure.
- **Défauts procédés** : représentent les défauts qui affectent le système lui-même, entraînant une modification de ces paramètres physiques internes.

En outre, en ce qui concerne la façon dont les défauts sont modélisés, ils sont classés comme de nature multiplicative ou de nature additive (figure 5.3) :

- **Défaut multiplicatif (a)** : s’il modifie un paramètre du système.
- **Défaut additif (b)** : s’il est introduit dans le système en tant que signal externe supplémentaire.

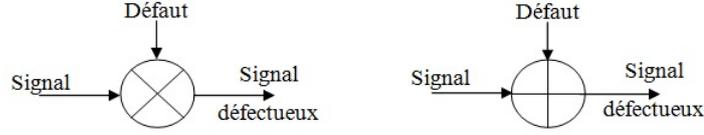


FIGURE 5.3 – Modélisation des défauts

5.2.3 Modélisation des défauts

Comme nous l'avons vu précédemment, les défauts sont souvent classés en additifs et en multiplicatifs selon leur mode de représentation. Ici, nous nous concentrons sur la représentation mathématique de ces défauts. Nous utilisons la représentation de l'espace d'état pour décrire un système dynamique, de sorte que la relation entre les entrées du système u et les sorties mesurées y s'écrit sous la forme :

$$\Sigma_{nom} : \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k + Du_k \end{cases} \quad (5.1)$$

Défaut multiplicatif : La modélisation multiplicative est surtout utilisée pour représenter les défauts des actionneurs et des capteurs. En particulier, les défauts d'actionneurs sont modélisés comme un changement brusque de l'action de régulation nominale décrite par :

$$u_k^f = \Gamma_A u_k \quad (5.2)$$

Où $\Gamma_A = \text{diag}(\gamma_1^a, \gamma_2^a, \dots, \gamma_m^a)$, $\gamma_i^a \in \mathbb{R}$. En remplaçant l'action de contrôle nominale u_k dans l'équation (5.1) par l'action défaillante u_k^f , on obtient le modèle d'espace d'état suivant :

$$\Sigma_{mult,af} : \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + B\Gamma_A u_k, \\ y_k = Cx_k + D\Gamma_A u_k \end{cases} \quad (5.3)$$

De cette manière $\gamma_i^a = 0$, $\gamma_i^a = 1$, $\gamma_i^a = \epsilon^a$, où $i = 1, 2, \dots, m$; $0 < \epsilon^a < 1$ représente respectivement une défaillance complète, un comportement normal et une perte partielle de l'actionneur i - th du système.

De même, les défaillances de capteurs survenant dans le système (5.1) représentent une lecture incorrecte des capteurs. Par conséquent, la sortie réelle du système diffère de la variable mesurée. Elles sont modélisées par :

$$y_k^f = \Gamma_S y_k \quad (5.4)$$

où $\Gamma_S = \text{diag}(\gamma_1^s, \gamma_2^s, \dots, \gamma_p^s)$, $\gamma_j^s \in \mathbb{R}$, tel que $\gamma_j^s = 0$ représente une panne totale du j ème capteur, et $\gamma_j^s = 1$ modélise le mode de fonctionnement normal du j ème capteur. En outre, les défauts partiels sont modélisés en prenant $\gamma_j^s \in (0, 1)$. Le modèle d'état-espace qui représente ces défauts est donné par :

$$\Sigma_{mult,sf} : \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \\ y_k = \Gamma_S Cx_k + \Gamma_S Du_k \end{cases} \quad (5.5)$$

Les modèles de la forme (5.3) ont été largement utilisés dans la littérature (voir, par exemple, [TCJ02], [NSHT00]). Il est intéressant de noter que les défauts multiplicatifs peuvent également être utilisés pour décrire les défauts procédés, mais uniquement dans certains cas particuliers.

Défaut procédé : Les défauts de procédés sont des défauts qui peuvent entraîner des changements dans n'importe quel élément d'un système dynamique. Ils appartiennent à la classe des défauts qui ne peuvent pas être classifiés comme un défaut de capteur ou d'actionneur. Ces défauts sont souvent modélisés sous la forme de variation des paramètres du modèle d'état :

$$\Sigma_{comp} : \begin{cases} x_{k+1} = A(f)x_k + B(f)u_k, \\ y_k = C(f)x_k + D(f)u_k \end{cases} \quad (5.6)$$

où $f \in \mathbb{R}^{n_f}$ est un vecteur de paramètres représentant les défauts des composants.

Cette classe de défauts peut être considérée comme un type particulier de défauts multiplicatifs. Supposons qu'il n'y ait qu'un seul défaut de composant dans un système dynamique Σ_{nom} . Cela transforme la matrice B de (5.1) en $B(f)$ et a une représentation explicite comme $B(f) = \Gamma_{bf}B$. En supposant que la matrice B est de rang plein colonne et qu'il existe une matrice diagonale $\tilde{\Gamma}_{bf}$ telle que :

$$\Gamma_{bf}B = B\tilde{\Gamma}_{bf} \Rightarrow \tilde{\Gamma}_{bf} = B^+\Gamma_{bf}B$$

où B^+ est le pseudo-inverse de la matrice B . La représentation de l'espace d'état démontrant ce type de défaut est donnée par :

$$\Sigma_{comp} : \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + \tilde{\Gamma}_{bf}u_k, \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (5.7)$$

Nous voyons que l'équation (5.7) est équivalente à (5.3) avec $D = 0$. De même, cela peut être exprimé pour les défauts multiplicatifs des capteurs également.

Défaut additif : Un modèle d'espace d'état avec des défauts additifs présente la forme :

$$\Sigma_{add} : \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Ff_k, \\ y_k = Cx_k + Du_k + Ef_k \end{cases} \quad (5.8)$$

où $f_k \in \mathbb{R}^{n_f}$ est un signal décrivant la défaillance. Cette représentation peut, en principe, être utilisée pour modéliser une large classe de défauts, y compris les défauts de capteurs, d'actionneurs et de composants. Par exemple, en posant (5.2) comme :

$$u_k^f = (\Gamma_A - I)u_k + u_k$$

donne (5.3), ce qui est équivalent à (5.8) avec $\begin{bmatrix} F \\ E \end{bmatrix} f_k = \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} (\Gamma_A - I) u_k$. En outre, cela peut être exprimé de la même manière pour le défaut multiplicatif des capteurs. Pour montrer le défaut de composant comme un cas particulier de défaut additif, on considère un défaut de composant dans la matrice B qui est représenté par $B_f = B \pm \Delta B_f$, puis $Ff_k := \pm(\Delta B_f)u_k$

L'un des avantages, comme déjà mentionné, est que la représentation additive peut être utilisée pour modéliser une classe de défauts plus générale que la représentation multiplicative. En outre,

elle est plus adaptée à l'étude de la conception des schémas FTC car, dans ce cas, les défauts sont représentés par l'intrusion d'un signal plutôt que par un changement dans les matrices d'espace d'état du système. Pour cette raison, la plupart des méthodes de diagnostic de défauts sont axées sur l'étude des défauts additifs [Him78], [Ise84a], [TNS98].

5.2.4 Diagnostic de défauts FDI

Le terme diagnostic désigne l'ensemble de mesures et de contrôles faits pour déterminer ou vérifier les caractéristiques techniques d'un système. L'acronyme anglo-saxon FDI (Fault Detection and Isolation) sera utilisé pour désigner le diagnostic.

En général, la tâche de diagnostic de défauts s'articule autour de trois activités principales :

1. la détection permet de détecter un dysfonctionnement dans le système et signale la présence d'un défaut.
2. la localisation des défauts consiste à cerner les éléments défectueux du système.
3. l'identification des défauts consiste à déterminer des caractéristiques des défauts telles que leur amplitude ou leur dynamique.

Le diagnostic de défauts repose sur la notion de redondance qui permet de fournir plusieurs informations différentes sur une même variable. Des tests vont alors permettre de vérifier la cohérence de ces informations. Nous pouvons distinguer deux approches :

- La redondance matérielle : consiste à mettre en place plusieurs capteurs pour obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système, ce qui engendre un coût important. Ce type de diagnostic se limite à la détection des défauts provenant des éléments redondants.
- La redondance analytique : présente une alternative intéressante et consiste à utiliser un modèle mathématique du système. Cette approche consiste à comparer le comportement du procédé réel par rapport au comportement théorique fourni par le modèle.

Les méthodes basées sur la deuxième approche sont plus simples et moins coûteuses que la première approche et s'appellent les méthodes à base de modèles. Elles peuvent être classées comme suit :

Espace de parité : l'idée est de tester la cohérence des mesures du système en utilisant les estimations fournies par le modèle (on parle de cohérence des mesures, de leur parité). Pour ce faire, les équations du modèle sont projetées dans un espace spécifique, appelé espace de parité, qui permet d'éliminer les états inconnus par des redondances. Les équations projetées ne comprennent que des variables mesurables (les entrées et les sorties du système) dans une fenêtre d'estimation donnée [PC91].

Identification paramétrique : dans cette approche, on estime un vecteur de paramètres en utilisant les mesures d'entrée-sortie et dont la variation à l'extérieur d'une plage de référence traduit l'apparition d'un défaut dans le système surveillé [Ise84b]. Cette variation ainsi que son amplitude peuvent alors être détectées à l'aide d'un test de décision dans l'espace paramétrique.

Estimation d'états : ces méthodes sont basées sur l'utilisation des observateurs d'état [Ise97]. L'observateur consiste en un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'erreur de sortie. Le principe est de reconstruire les états et les sorties du système à partir des entrées et des sorties, ensuite la génération des résidus est obtenue en effectuant la différence entre les sorties mesurées et leurs estimations. Plusieurs observateurs ont été étudiés dans la

littérature, mais deux en particulier restent les plus utilisés, le premier correspond à l'observateur de Luenberger dans le cadre déterministe, tandis que le second concerne l'observateur de Kalman (souvent appelé Filtre de Kalman) dans le cadre stochastique. Ces deux observateurs seront étudiés dans la section suivante.

Le principe général de ces méthodes quantitatives à base de modèle est de comparer le comportement réel du procédé avec le comportement théorique fournie par le modèle analytique, et le résultat de cette comparaison est généré par un ensemble de signaux appelés résidus. Ces résidus sont proches de zéro dans des situations sans défaut tout en s'écartant clairement de zéro en présence de défauts, ce qui permet la détection de défaut. La principale difficulté de la détection réside dans la détermination du seuil caractérisant l'occurrence d'un défaut, un seuil trop grand engendre des non-détections et un seuil trop petit entraîne de fausses alarmes. Lorsqu'un défaut est détecté, une procédure de localisation est utilisée pour permettre de déterminer son origine. Pour permettre la localisation, le vecteur de résidus doit avoir un certain nombre de propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque défaut. La dernière étape est l'identification qui consiste à déterminer les caractéristiques du défaut. Cette identification (ou estimation) du défaut permet de donner une image beaucoup plus précise de l'état du système et surtout permet de mettre en œuvre des techniques de commande tolérante aux défauts [CP12]. Ces étapes seront développées dans la section 5.3 et appliquées dans la section 5.4.

5.2.5 Synthèse d'observateurs pour le diagnostic

Nous détaillerons dans cette section les deux structures des observateurs les plus utilisés pour les systèmes dynamiques, nous nous limitons ici au cas des systèmes linéaires, et nous développerons un nouvel observateur pour un système bi-linéaire dans la section (5.3.2). Un observateur ne peut estimer les états d'un système que si ce dernier est observable.

5.2.5.1 Observabilité

Un système représenté sous forme d'équations d'état d'ordre n est dit observable si et seulement si la matrice d'observabilité (équation 5.9) est de rang n (rang $O = n$).

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

5.2.5.2 Observateur de Luenberger

Soit un système linéaire discret :

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (5.10)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (5.11)$$

L'observateur de Luenberger est exprimé par :

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)) \quad (5.12)$$

Connaissant A , B et C . Ceci peut s'écrire comme suit :

$$\hat{x}(k+1) = (A - LC)\hat{x}(k) + Bu(k) + Ly(k) \quad (5.13)$$

L'erreur entre l'état actuel et l'état estimé est définie par :

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (5.14)$$

Si l'on décompose $e(k)$ et que l'on substitue ensuite l'équation 5.10 et l'équation 5.13 dans cette équation, on obtient :

$$e(k+1) = (A - LC)(x(k) - \hat{x}(k)) \quad (5.15)$$

Cela peut aussi s'écrire comme suit :

$$e(k+1) = (A - LC)e(k) \quad (5.16)$$

La matrice L est choisie librement par le concepteur de l'observateur et elle doit être choisie en sorte que les valeurs propres de $(A - LC)$ soient toutes négatives. Ensuite, si la plus grande valeur propre est $-\sigma$, toutes les entrées de e approcheront zéro à un taux d'au moins $e^{-\sigma t}$. Cela signifie que même si l'erreur initiale est importante, l'état estimé se rapprochera rapidement de l'état réel, c'est-à-dire que l'observateur sera stable. Si la paire (A, C) est observable, les valeurs propres de $(A - LC)$ peuvent être choisies arbitrairement. La figure 5.4 montre la structure de l'observateur discret de Luenberger avec le système.

5.2.5.3 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman estime l'état d'un système donné par l'équation d'état suivante :

$$x_k = A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \quad (5.17)$$

$$y_k = C_k x_k + v_k \quad (5.18)$$

où w_k et v_k sont les vecteurs de bruit affectant respectivement l'état du système et les mesures, et sont supposés être des bruits blancs gaussiens centrés. L'estimation du vecteur d'état est faite en résolvant les équations 5.19 - 5.23 à chaque pas de temps, ces équations constituent le filtre de Kalman :

$$P_k^- = A_{k-1}P_{k-1}^+A_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (5.19)$$

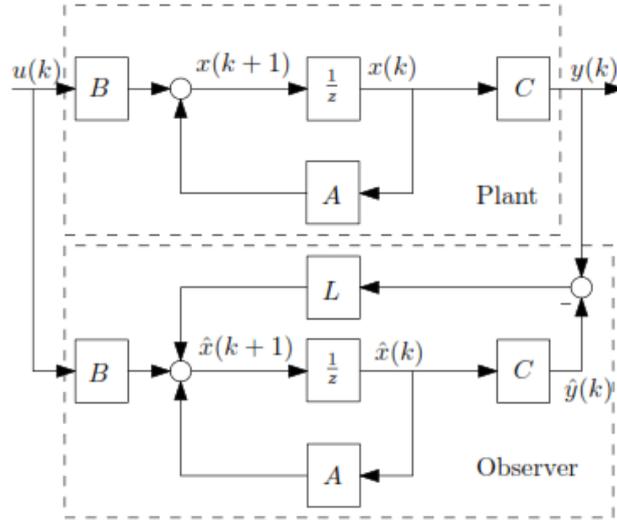


FIGURE 5.4 – Observateur de Luenberger

$$K_k = \frac{P_k^- C_k^T}{C_k P_k^- C_k^T + R_k} \quad (5.20)$$

$$\hat{x}_k^- = A_{k-1} \hat{X}_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1} \quad (5.21)$$

où (5.21) est une estimation a priori de l'état

$$\hat{x}_k^+ = \hat{X}_{k-1}^- + K_k (y_k - C_k \hat{x}_k^-) \quad (5.22)$$

où (5.22) est une estimation a posteriori de l'état

$$P_k^+ = (I - K_k C_k) P_k^- (I - K_k C_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (5.23)$$

Ceci est une brève description de la notation utilisée dans ces équations. \hat{x}_k est l'estimation d'état et P_k est la matrice de covariance de l'erreur d'estimation. Le moins (-) et le plus (+) indiquent respectivement des estimations a priori et a posteriori. K_k est le gain de Kalman optimal et I est la matrice identité. Pour que cet algorithme fonctionne correctement, il faut fixer des valeurs initiales pour \hat{x}_0^+ et P_0^+ . Ces valeurs initiales sont des paramètres de réglage importants dans le filtre de Kalman. \hat{x}_0^+ est la supposition initiale des états actuels tandis que P_0^+ indique combien il faut faire confiance à ces états initiaux. Les matrices de covariance Q_k et R_k sont définies comme suit :

$$Q_k = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & Q_n \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & R_m \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Où Q_k est une matrice carrée de dimension égale à la matrice d'état A , et la matrice R_k est carrée de dimension égale au nombre de mesures. Habituellement, ces matrices sont diagonales et leurs paramètres sont réglés par l'utilisateur pour régler le filtre de Kalman afin d'obtenir de bonnes estimations de la ou des sorties et de l'état ou des états. Q_k peut être considéré comme une matrice qui indique dans quelle mesure le modèle est digne de confiance (c'est-à-dire dans quelle mesure le modèle est correct par rapport au système réel?). R_k peut être considéré comme une matrice qui indique dans quelle mesure la variable mesurée est digne de confiance (c.-à-d. les mesures sont-elles correctes?). Lors de la simulation, les équations 5.19-5.23 sont calculées à chaque pas de temps, c'est-à-dire qu'elles se comportent comme une boucle *for* qui est répétée à chaque pas de temps. Cette boucle est illustrée à la figure 5.5. S'il est correctement réglé, le filtre de Kalman permettra d'éliminer le bruit de mesure et d'obtenir de bonnes estimations de l'état et de la sortie du système.

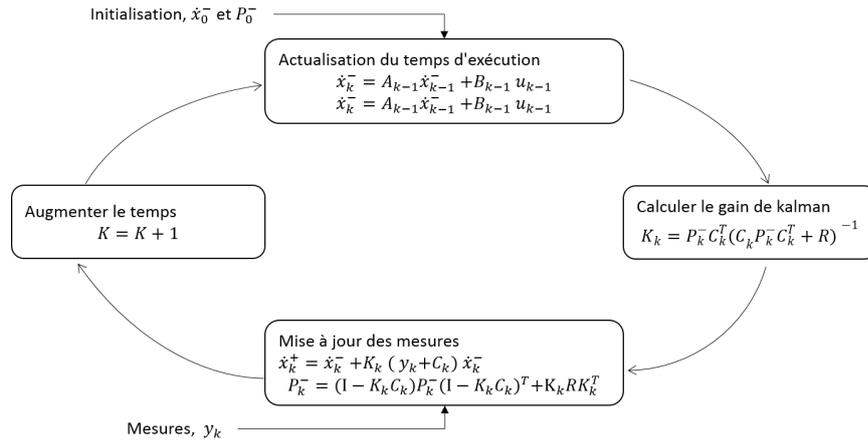


FIGURE 5.5 – Filtre de Kalman

5.2.6 Commande tolérante aux défauts FTC

Une fois le défaut détecté, localisé et identifié comme expliqué dans la section (5.2.4), se pose la question de savoir quelle stratégie adopter afin de permettre au système d'assurer la tâche pour laquelle il a été conçu. Cette question conduit à la notion générale de systèmes de commande tolérante aux défauts.

Un système tolérant aux défauts a pour objectif de permettre le maintien des objectifs désirés, non seulement en fonctionnement nominal mais même en présence de défauts. Il est très important de préciser que les objectifs à atteindre durant ces deux modes de fonctionnement sont différents. Dans le mode nominal, des objectifs de qualité sont à assurer, en revanche en présence de défauts, des objectifs dégradés peuvent être acceptés. Le schéma général d'un système muni d'un système tolérant aux défauts est présenté sur la figure 5.6.

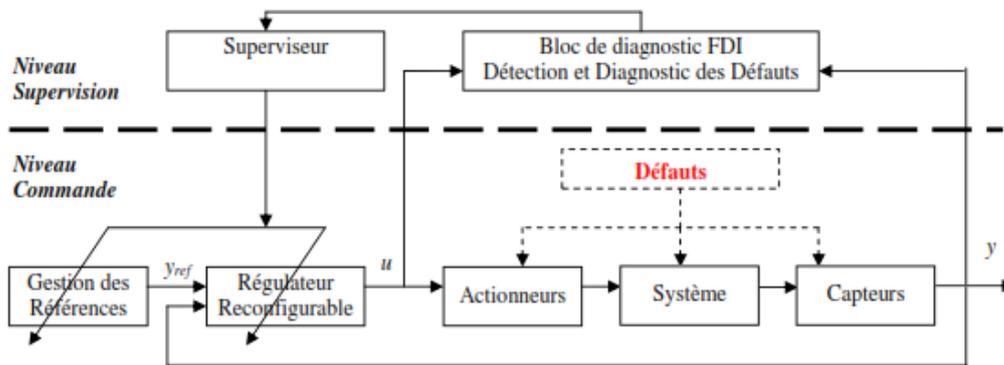


FIGURE 5.6 – Structure générale du système tolérant aux défauts.

Les techniques (ou méthodes) de commande tolérante aux défauts sont classées en deux catégories distinctes comme illustrées à la figure 5.7 : les méthodes de commande passives (PFTC) et les méthodes de commande actives (AFTC).

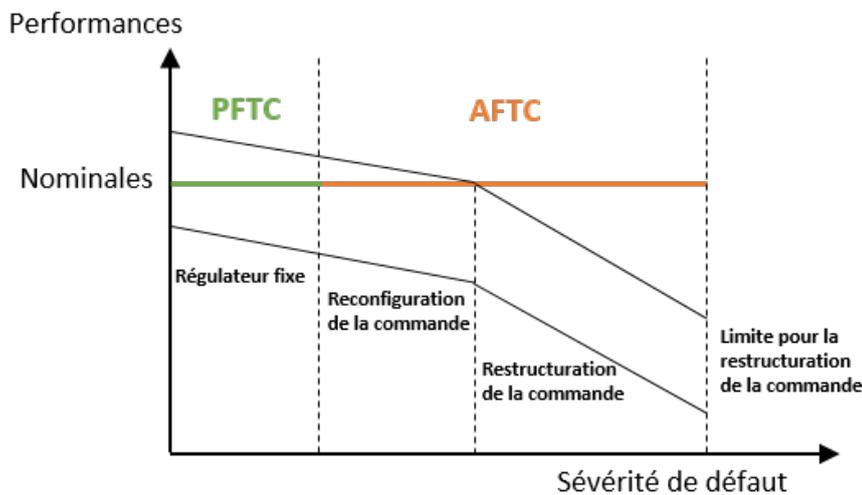


FIGURE 5.7 – Types des systèmes tolérants aux défauts.

5.2.6.1 Méthodes passives PFTC

Les méthodes PFTC ne requièrent pas la présence d'un module de diagnostic et utilisent les techniques de la commande robuste. Ces méthodes passives ont en conséquence une faible capacité de tolérance aux défauts.

Cette première approche requière une charge de calcul moindre mais suppose que les défauts sont a priori connus. La sélection du contrôleur associé au mode de fonctionnement actif (présent) est effectuée par le superviseur, qui est constitué d'un ensemble d'estimateurs permettant la reconstruction des sorties du système pour chaque mode de fonctionnement. Après avoir évalué les performances de chaque mode, le contrôleur adéquat est sélectionné comme illustré à la figure 5.8. Cette approche semble peu commode dans le cas d'un traitement d'un nombre important de défauts car il faut également un nombre important de contrôleurs à synthétiser.

De ce fait, nous nous intéressons davantage à la seconde approche fondée sur la synthèse d'une nouvelle loi de commande en ligne.

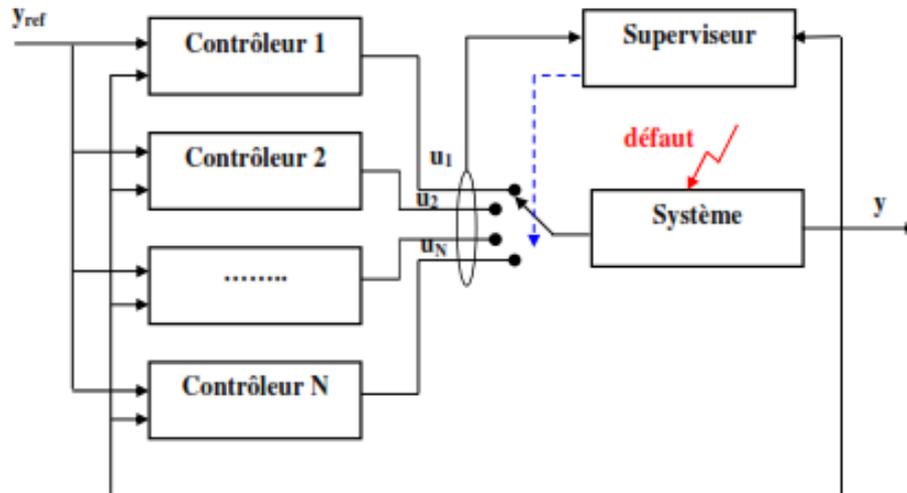


FIGURE 5.8 – Le principe de la commande PFTC pré calculée.

5.2.6.2 Méthodes actives AFTC

Les méthodes AFTC se distinguent des méthodes PFTC par l'utilisation d'un module FDI et par une synthèse en ligne du contrôleur. Les méthodes actives sont amenées à réagir aux divers défauts du système en modifiant en ligne les lois de commande afin de maintenir l'objectif global, i.e., la stabilité et les performances du système de commande. Elles tolèrent des défauts plus sévères et la tenue de performances est supérieure à celles utilisant des méthodes passives. Les méthodes actives se déclinent en deux classes de stratégies. Pour ces deux stratégies, les lois de commande adéquates peuvent être soit sélectionnées parmi un ensemble de contrôleurs précalculées hors-ligne (méthodes de projection), soit calculées en ligne.

Cette seconde approche permet de traiter le cas des défauts non connus a priori mais elle suppose une identification en ligne des paramètres du système. En fonction de l'impact du défaut sur les performances du système (perte partielle ou totale de leur capacité d'opération) et des informations qui peuvent être fournies par le bloc diagnostic, deux cas peuvent être considérés : la reconfiguration ou la restructuration. Des définitions fondamentales de ces termes ont été proposées par [SG01] et [BKL⁺06a]. Dans [Nou02], l'auteur a défini la reconfiguration et la restructuration comme suit :

Reconfiguration : Selon la gravité des défauts et de la redondance matérielle disponible, une stratégie de reconfiguration peut être mise en œuvre afin d'ajuster en ligne les paramètres du contrôleur lorsque le défaut peut être accommodé sans trop dégrader les performances nominales du système. Les objectifs nominaux prédéfinis sont conservés. Le nombre de sorties à asservir et le nombre d'entrées de commande valides restent inchangés.

Restructuration : Lorsqu'il n'est plus possible de préserver les performances en sortie

du système, une stratégie de restructuration permet de commander le procédé en mode dégradé, en utilisant le meilleur compromis possible entre tous les objectifs nominaux et assure l'arrêt du système en toute sécurité dans un futur proche. Une modification de la structure du système est nécessaire. Par exemple, dans le cas d'une perte totale d'un actionneur ou d'un composant, l'asservissement de toutes les sorties du système ne peut plus être assuré. La restructuration pourrait consister à établir une priorité entre ces sorties à réguler.

Les principales méthodologies pour la conception de stratégies d'accommodation de défauts sont :

La méthode pseudo-inverse (en anglais Pseudo-Inverse Method) [HS90], [GA91a] consiste à modifier la loi de commande par retour d'état de telle sorte que la dynamique du système défaillant en boucle fermée soit approximativement égale à celle du système nominal en boucle fermée en minimisant un critère donné. Le principal inconvénient relatif à cette méthode réside dans le fait que la loi de commande optimale ne garantit pas toujours la stabilité en boucle fermée du système défaillant. Pour palier ce problème, la méthode pseudo-inverse modifiée a été développée dans [GA92a] en ajoutant une contrainte supplémentaire telle que le système en boucle fermée soit stable.

La méthode de placement de structure propre pour la conception de loi de commande tolérante aux défauts a été introduite initialement par [ASC83] et a fait l'objet de plusieurs publications, par exemple [KA96], [WL00], [ZJ02a]. L'avantage de cette approche comparée à la méthode de la pseudo-inverse réside dans le fait que la solution fournie (si elle existe), assure la stabilité de la boucle fermée du système défaillant.

La loi de commande par séquençement de gain appartient à la classe des méthodes à base de projection [Rug90], [SR99]. Cette méthode a été largement appliquée au domaine de l'aéronautique où un contrôleur ne peut remplir l'ensemble des objectifs de performance et de robustesse sur la totalité du domaine de fonctionnement (situation nominale et défaillante). L'idée consiste alors, à partir d'une structure d'une loi de commande FTC fixe, à modifier la valeur des gains du contrôleur FTC en fonction de certains paramètres physiques variant avec le temps (la vitesse d'un véhicule, l'altitude, la masse, etc.) et/ou en fonction d'un résultat de diagnostic.

La méthode de poursuite d'un modèle de référence est une approche FTC active séduisante qui permet de concevoir une nouvelle loi de commande telle que les performances du système défaillant commandé s'approche le plus possible de celles d'un modèle de référence, au sens d'un critère [ZJ02b], [Sta05].

La plupart des stratégies d'accommodation aux défauts ont été développées pour le cas de modèles linéaires. Certaines techniques citées précédemment, telles que les méthodes par modèle de poursuite, pourraient être appliquées à des systèmes non-linéaires en utilisant la stratégie de commande non-linéaire par linéarisation entrées/sorties. Mais la commande non-linéaire reste difficile à mettre en œuvre sur des systèmes industriels complexes.

L'approche multi-modèle attire l'attention de nombreux chercheurs pour résoudre le problème de l'accommodation dans les systèmes non-linéaires [TSP03], [Rod05]. En effet, ces

techniques permettent de commander un système non-linéaire sur une large zone de fonctionnement décomposée en plusieurs zones linéarisées autour de différents points de fonctionnement. Des techniques applicables aux systèmes linéaires restent alors utilisables dans le cadre des systèmes décrits par de multiples modèles.

La commande adaptative est une commande très appropriée dans le cadre de la commande active tolérante aux défauts. En effet, ce type de commande est capable d'adapter automatiquement les paramètres du contrôleur en fonction des changements du système. Ce type de méthode ne requiert donc pas de module FDI comme dans le cas des approches AFTC. Les méthodes de commandes avec paramètres linéaires variant dans le temps ou Linear Parameter Varying (LPV) dédiées au FTC sont incluses dans la classe des commandes adaptatives comme celles développées dans la thèse de [VKH⁺10]. D'autres méthodes adaptatives sont proposées dans [TJ05],[PK09].

La commande prédictive et son potentiel à résoudre le problème de l'accommodation aux défauts a été montré par Maciejowski [Mac97]. Les méthodes proposées permettent de réadapter le contrôleur en présence d'un défaut de manière à garantir la stabilité du système et à maintenir des performances très proches de celles du système nominal. On notera tout de même que l'utilisation de la commande MPC nécessite une optimisation en ligne, exigeant une grande puissance de calcul puisqu'elle consiste à résoudre, à chaque pas de temps, un problème de commande optimale, c'est-à-dire déterminer l'action de commande qui minimise un critère quadratique donné (souvent sujet aux contraintes).

5.2.7 Analyse du système global FDI/FTC

La performance du système global FDI/FTC tel que suggéré dans [ZJ08] dépend de nombreux facteurs, notamment :

- La rapidité et l'exactitude du système FDI en ligne.
- La disponibilité des actionneurs ou capteurs (fonctionnels) encore en bon état.
- La stratégie d'utilisation de la redondance matérielle ou analytique du système.
- Le type de la stratégie de commande adoptée dans la conception du contrôleur FTC.
- L'intégration de ces composantes pour former un système FDI/FTC globale.

De nombreuses applications traitent un ensemble de situations de défauts qui sont connues à l'avance [LL06], [BKL⁺06b]. La conception de la loi de commande, de telle sorte que les effets secondaires d'un défaut soient compensés, est généralement effectuée par des schémas de commande FTC vus précédemment. Néanmoins, quelle que soit la stratégie de commande FTC (passive ou active), sa faisabilité dépend de la performance de la partie diagnostique FDI de chaque défaut [Wu04], [Sta02].

En raison des contraintes en temps réel et de la nature dynamique du système, le temps disponible pour effectuer la construction du modèle après défaillance (estimation) et pour la reconfiguration du contrôleur est généralement très limité. Le compromis entre les différents objectifs de conception et l'interaction entre les différents sous-systèmes doivent être effectués

en ligne. Ces enjeux sont associés à la modélisation, la stabilité, la performance, la robustesse, la non-linéarité, la simulation, la mise en œuvre et les applications.

En outre, compte tenu de la complexité du problème, la plupart des recherches sur le diagnostic FDI et la commande FTC sont menées en tant que deux entités distinctes. Plus précisément, la plupart des techniques de FDI sont développées comme un outil de diagnostic ou de contrôle, plutôt que comme partie intégrante du système global FDI/FTC. Par conséquent, certaines méthodes de FDI existantes peuvent ne pas être en mesure de satisfaire le besoin de reconfiguration des contrôleurs [ZJ08]. D'autre part, la plupart des recherches sur la commande FTC sont menées en supposant la disponibilité du FDI parfait. Cela exige la disponibilité d'informations complètes sur le modèle du système défaillant, ce qui pourrait ne pas être accessible en permanence. Un travail mineur a été effectué sur la réduction du temps nécessaire au mécanisme de reconfiguration des contrôleurs et cette approche est connue sous le nom d'approche progressive d'adaptation aux défauts [Sta04]. Cependant, aucun traitement du temps pris dans le module FDI n'est envisagé. Dans la plupart des méthodes AFTC décrites ci-dessus, la stabilité du système après défaillance ne peut être garantie pendant la période où l'unité FDI remplit ses fonctions de diagnostic. Par conséquent, une attention particulière doit être accordée à une approche intégrée. De plus, dans ces approches AFTC, il faut toujours une unité FDI parfaite pour effectuer le mécanisme de reconfiguration. Une approche prometteuse est proposée dans [Y⁺08] qui n'utilise pas de module FDI explicite pour traiter les systèmes AFTC.

Un autre problème inhérent au système globale FDI/FTC est la propagation de transitoires tout en reconfigurant les contrôleurs. Lorsque les lois de contrôle considérées sont de nature statique, aucune précaution n'est requise pendant le processus de reconfiguration. Toutefois, la situation est différente pour les contrôleurs dynamiques. En effet, les états du contrôleur qui n'est pas dans la boucle doivent être initialisés correctement avant qu'il ne soit introduit dans la boucle. Si ce phénomène n'est pas pris en compte dans le FDI/FTC, des transitoires indésirables peuvent se produire, ce qui nuit à la sécurité du système. Les conséquences de ces transitoires peuvent provoquer des saturations dans les actionneurs et des dommages aux composants du système. Par conséquent, ces transitoires devraient être réduits au minimum.

Ce phénomène est souvent appelé "phénomène de choc" [HKH87] ou "commutation en douceur" [SKP00]. Les solutions potentielles pour réduire ces transitoires de reconfiguration peuvent résider dans la manière de gérer les états du système/contrôleur ou les entrées de commande. Une brève étude comparative sur le transfert sans à-coups des contrôleurs a été réalisée dans [PÁGB10]. Le cas du passage d'un contrôleur multivariable stabilisateur à un autre est examiné dans [NSA04]. Récemment, une approche prometteuse a été proposée dans [YQK10] qui est basée sur la paramétrisation de contrôleurs candidats ayant une dynamique commune. Un traitement plus complet sur la gestion de la transition pour les systèmes de contrôle reconfigurables se trouvent dans [GCW⁺03].

5.3 Contributions au diagnostic de défauts et à la commande tolérante aux défauts

5.3.1 Approche linéaire

L'objectif dans cette section est de concevoir un nouveau filtre linéaire capable de détecter un défaut et permet la reconfiguration du contrôle. Son application sera présentée dans la section suivante(5.4).

5.3.1.1 Conception de filtres isolateurs de défauts

Nous considérons un système linéaire dans des conditions de fonctionnement sans défaut décrit en temps discret par :

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\y_k &= Cx_k\end{aligned}\tag{5.26}$$

où $x_k \in R^n$ est le vecteur d'état, $y_k \in R^m$ le vecteur d'observation de sortie, $u_k \in R^p$ le vecteur d'entrée et A, B et C sont des matrices connues de dimensions appropriées. Les défauts (additifs) sont généralement décrits à l'aide d'un vecteur d'entrée inconnu agissant directement sur la dynamique ou sur les mesures du système. Dans la suite, seules les défaillances des actionneurs sont prises en compte. Un défaut d'actionneur peut être représenté par un changement dans la colonne de la matrice B . Par exemple, la perte d'efficacité des actionneurs peut être reflétée dans la matrice de contrôle B qui devient $B_f = [\alpha_1 \text{col}_1(B) \dots \alpha_p \text{col}_p(B)]$ où $0 \leq \alpha_i \leq 1$. En cas de perte complète du i ème actionneur (défaillance totale), $\alpha_i = 0$.

Puisque B_f est une matrice inconnue, la représentation de l'espace d'état du système défaillant nécessite la définition de l'entrée inconnue :

$$f = [\dots \alpha_i \dots]^T \quad \text{for } i = 1, \dots, p \quad \alpha_i \neq 0$$

avec $F = [\dots \text{col}_i(B) \dots]$ alors pour les défauts d'actionneurs, le modèle de l'équation (5.26) devient :

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Ff_k \\y_k &= cx_k\end{aligned}\tag{5.27}$$

La stratégie proposée pour s'adapter aux défaillances se compose de deux étapes [NSH97],[SH99] :

- La première étape est le FDI qui consiste à détecter, isoler et estimer les paramètres de défaut .
- La deuxième étape est le mécanisme de reconfiguration. Le FDI active une boucle de compensation des défauts afin d'annuler l'effet du défaut sur le système.

Le problème à traiter dans la première étape diagnostic de défaut ici est de concevoir un filtre linéaire dont les entrées sont les sorties mesurables et les entrées de contrôle qui génèrent certaines sorties appelées signaux résiduels [SYAH15]. Lorsque les signaux résiduels sont sensibles à un défaut et non à l'autre, ils appartiennent à la catégorie des filtres d'isolation des défauts (FIF)

[WS87]. Par conséquent, notre objectif est de trouver un filtre de la forme :

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k+1} &= (A - KC)\hat{x}_k + Bu_k + \bar{K}y_k \\ y_k &= Cx_k + w_k\end{aligned}\tag{5.28}$$

et le générateur de résidus est : $r_k = T(y_k - \hat{y}_k)$ où K et $T \in R^{n,m}$ sont des matrices qui sont conçues pour répondre aux exigences de détection et d'isolation des défauts.

A partir de (5.27) et (5.28), l'erreur d'estimation $e_k = x_k - \hat{x}_k$ et la sortie du filtre se propagent comme

$$\begin{aligned}e_{k+1} &= (A - KC)e_k + Ff_k \\ r_k &= TCe_k\end{aligned}\tag{5.29}$$

Le but étant de détecter, d'isoler les défauts et d'estimer leurs amplitudes, il est suggéré de déterminer les matrices de gain K et T , en sorte que le générateur résiduel possède des propriétés directionnelles fixes.

Définition 1 : Indices de détectabilité des défauts [LS97] .

Avec $F = [\varphi_1 \varphi_2 \cdots \varphi_q]$, le système linéaire invariant dans le temps (5.27) présente les indices de détectabilité des défauts suivants :

$$\rho_i = \min \left\{ v : CA^{v-1}\varphi_i \neq 0, v = 1, 2, \dots \right\}\tag{5.30}$$

Et, la matrice de détectabilité des défauts $D = C\Psi$ est donnée par $\Psi = [A^{\rho_1-1}\varphi_1 \cdots A^{\rho_q-1}\varphi_q]$

Théorème 1 : Structure diagonale du résidu [JS10].

Pour le système (5.27) et le générateur résiduel donné par :

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k+1} &= (A - KC)\hat{x}_{k+1} + Bu_k + Ky_k \\ r_k &= T(y_k - \hat{y}_k)\end{aligned}\tag{5.31}$$

la fonction de transfert des défauts vers le résidu présente une structure diagonale si les conditions suivantes sont remplies.

$$(A - KC)\Psi = 0\tag{5.32}$$

La solution du plan résiduel fait maintenant appel au théorème suivant de Keller [Kel99].

Théorème 2 : Paramétrage du filtre

Sous la condition $\text{rang}(D) = q$, les solutions à (5.31) peuvent être paramétrées comme :

$$K = \omega\Pi + \bar{K}\Sigma\tag{5.33}$$

avec $\Sigma = \beta(1 - D\Pi)$, $D = C\Psi$, $\Pi = D^+$, $\omega = A\Psi$ où $\beta \in R^{m-q,m}$ est une matrice arbitraire déterminée de sorte que la matrice Σ est de rang plein rang et $\bar{K} \in R^{m-q,m}$ est le gain réduit décrivant le degré de liberté restant.

A partir de ce théorème, le filtre isolateur de défauts est réécrit à partir du paramètre libre \bar{K}

comme :

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k+1} &= A\hat{x}_k + Bu_k + \omega a_k + \bar{K}\Sigma(y_k - C\hat{x}_k) \\ \alpha_k &= \Pi(y_k - C\hat{x}_k)\end{aligned}\tag{5.34}$$

où α_k est une estimation du filtre deadbeat de défaut f_k donnée par :

$$\alpha_k = \begin{bmatrix} \hat{f}_{k-\rho_1}^1 \cdots \hat{f}_{k-\rho_s}^s \end{bmatrix}\tag{5.35}$$

à partir des erreurs d'estimation de l'état sans défaut qui se propage comme :

$$\bar{\varepsilon}(k+1) = (A - KC)\bar{\varepsilon}(k)\tag{5.36}$$

où le défaut $f_{k-\rho_i}^i$ avec comme indice de détectabilité $k - \rho_i$ affecte directement le résidu de sortie réduit avec un délai égal à son indice de détectabilité. $r(\kappa)$ peut également être considéré comme un observateur stochastique des magnitudes des défauts. En outre, il est démontré que : $\alpha_k = \Pi(y_k - C\hat{x}_k)$ est sensible aux défauts, alors que $\gamma_k = \Sigma(y_k - C\hat{x}_k)$ est découplé des défauts puisque $\Pi D = I$ et $\Pi \Sigma = 0$

5.3.1.2 Reconfiguration du contrôle

Lorsque le modèle exact du système défaillant est connu, le système de contrôle peut être adapté de manière à ce que les performances du système soient récupérées et que le nouveau système se comporte comme indiqué initialement. Gao et Antsaklis [GA91b], [GA92b] et Morse et Ossman [MO90] suggèrent une approche de base basée sur ce qu'ils appellent la méthode pseudo-inverse. Dans la pratique, cependant, les défauts sont imprévus et le modèle du système altéré n'est pas disponible. Une fois que le module FDI indique quel actionneur est défectueux, l'ampleur du défaut est estimée et une nouvelle loi de contrôle est ajoutée à la loi nominale pour contrecarrer l'effet du défaut sur le système. Le remplacement du contrôleur dans les équations (5.27) du système affecté par un défaut d'actionneur conduit à la représentation de l'espace d'état en boucle fermée :

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= (A - BK_{cl})x_k + Ff_k \\ y_k &= Cx_k\end{aligned}\tag{5.37}$$

Nous proposons de calculer une nouvelle loi de contrôle u^{ad} à ajouter à la loi nominale pour compenser l'effet de la défaillance sur le système. Par conséquent, la loi de contrôle totale appliquée au système est donnée par

$$u_k = K_{cl}x_k + u_k^{ad}\tag{5.38}$$

Ainsi, l'équation d'état en boucle fermée devient :

$$x_{k+1} = (A - BK_{cl})x_k + Ff_k + Bu_k^{ad}\tag{5.39}$$

La loi de contrôle supplémentaire doit être calculée de manière à ce que le système défectueux soit le plus proche possible du système nominal. En d'autres termes, doit satisfaire :

$$Bu_k^{ad} + Ff_k = 0\tag{5.40}$$

En utilisant l'estimation de l'ampleur du défaut décrit dans la section précédente $\alpha_i(k) = \hat{f}_{k-\rho_i}^i$ la solution de (5.40) peut être obtenue par la relation suivante si la matrice B est de rang plein :

$$u_k^{ad} = -B^+ F \alpha_k \quad (5.41)$$

où B^+ est la pseudo-inverse de la matrice B .

En cas de défaillance totale, entraînant une perte de l'actionneur, il n'est pas possible de récupérer les performances nominales via ce mécanisme de reconfiguration. Supposons que l'actionneur soit hors service à un moment donné, alors les équations du système peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} x_{x+1} &= Ax_k + \tilde{B}\bar{u}_x + Ff_x \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (5.42)$$

où :

$$\begin{aligned} B &= [\tilde{B}, \text{col}_q(B)], \quad \bar{u}_k = [u_1(k) \dots u_{q-1}(k)] \\ F &= \text{col}_q(B), \quad f_k = u_{q-1}(\theta) \end{aligned}$$

Ensuite, en utilisant les actionneurs sûrs restants, les performances initiales peuvent être récupérées si le système est contrôlable avec un signal de commande compensatoire :

$$x_{x+1} = (A - \tilde{B}\tilde{K}_{cl}) x_k + \tilde{B}u_k^{ad} + Ff_k \quad (5.43)$$

tels que :

$$u_k^{ad} = -\tilde{B}^+ F \hat{f}_k \quad (5.44)$$

et :

$$\tilde{K}_{cl} = \tilde{B}^+ \tilde{B}K_{cl} \quad (5.45)$$

5.3.2 Approches bi-linéaires

L'objectif dans cette section est de concevoir un observateur dans le cas du système bi-linéaire capable de détecter un défaut et permet la reconfiguration du contrôle, puis l'appliquer sur un bâtiment multizone dont les résultats seront présentées dans la section suivante.

5.3.2.1 Conception d'observateurs bilinéaires

Le modèle du système bâtiment tel qu'introduit dans la section (3.7.2) s'écrit sous la forme bilinéaire suivante :

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + \sum_{i=1}^p u_k^i D_i x + E_1 d_k^1 + E_2 d_k^2 + Gf_k^a \quad (5.46a)$$

$$y_k = Cx_k + Qf_k^s \quad (5.46b)$$

avec $x_k \in R^n$, $u_k = [u_k^1, u_k^2, \dots, u_k^p] \in R^p$ et $y_k \in R^m$ qui désignent respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée de commande et les mesures. f_k^a et f_k^s sont des entrées inconnues

représentant les défauts d'actionneurs et de capteurs. d_k^1 désigne les entrées de perturbations supposées connues alors que d_k^2 rassemble les entrées inconnues. Notre objectif est de réaliser la synthèse d'un générateur de résidus basé sur un observateur non linéaire.

Dans la littérature de nombreuses approches ont été proposées à cette fin [YDL15], [KK98], [XG89], [KPP15]. En raison de sa simplicité de mise en œuvre, nous avons choisi de nous inspirer de l'observateur proposé par Yu et Shields [YS96].

Considérons pour l'observateur, l'équation suivante :

$$z_{k+1} = Hz_k + Bu_k + Ly_k + \sum_{i=1}^p u_k^i D'_i z_k + \sum_{i=1}^p u_k^i M_i y_k + E_1 d_k^1 \quad (5.47)$$

Avec $z_k = T\hat{x}_k$ où \hat{x}_k représente l'estimation de l'état du système.

Le système (5.47) est un observateur du système(5.46) si et seulement si la condition suivante est satisfaite pour tout u et tout $d = [d^1 \quad d^2]^T$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\hat{x}_k - x_k\| = 0 \quad (5.48)$$

pour $f_k^a = 0$ et $f_k^{as} = 0, \forall k$ et x_0 et \hat{x}_0

Cette définition requière de démontrer la convergence de l'observateur. Il s'agit donc de déterminer les matrices H, L, D'_i, M_i , et T telle que la condition (5.48) soit réalisée. A ce stade du raisonnement, dans le modèle de l'équation (5.47) les défauts de capteur sont considérés comme des entrées inconnues, sans plus de précision sur leur modélisation.

Pour démontrer la convergence de l'observateur, on considère l'erreur d'estimation de l'état, définie comme $e_k = z_k - Tx_k$ obéit à la dynamique suivante :

$$e_{k+1} = Hz_k - TAx_k + L(Cx_k + Qf_k^s) + \sum_{i=1}^p (u_k^i D'_i z_k - u_k^i T D_i x_k) + \sum_{i=1}^p u_k^i M_i (Cx_k + Qf_k^s) - TE_1 d_k^2 - TGf_k^a \quad (5.49)$$

$$e_{k+1} = He_k - (TA - HT - LC)x_k + LQf_k^s + \sum_{i=1}^p u_k^i D'_i e_k + \sum_{i=1}^p u_k^i (D'_i T - T D_i + M_i C) x_k + \sum_{i=1}^p u_k^i M_i Qf_k^s - TE_1 d_k^2 - TGf_k^a \quad (5.50)$$

Si à présent les conditions suivantes sont réunies :

$$TA - HT = LC \quad (5.51)$$

$$D'_i T - T D_i + M_i C = 0 \quad (5.52)$$

$$TE_2 = 0 \quad (5.53)$$

et avec $D'_i = 0$ comme dans Yu et Shields [YS96], alors :

$$e_{k+1} = He_k + \sum_{i=1}^p u_k^i M_i Q f_k^s - TG f_k^a \quad (5.54)$$

et en l'absence de défaut l'erreur d'estimation de l'état de l'observateur (5.47) converge vers zéro si la matrice H est Hurwitz. Cette condition garantit que l'observateur est asymptotiquement stable. Examinons plus en détail les conditions d'exploitation de l'observateur pour le diagnostic de défauts. La condition (5.53) permet de rendre l'observateur insensible aux entrées inconnues de perturbation. De plus on a la condition suivante de détectabilité de défauts qui est remplie : Si k_0 désigne l'instant d'apparition du défaut :

$$\forall k > k_0 \text{ si } f_k^a \neq 0 \text{ ou } f_k^s \neq 0 \text{ alors } e_{k+1} \neq 0$$

Cependant cette condition ne garantit pas l'isolabilité des défauts. Celle-ci peut être assurée par la structuration des résidus selon un schéma de type DOS (Dedicated observer) ou GOS (Generalized Observer Scheme)[FD97]. Cependant, à notre connaissance, cette approche n'a pas été appliquée aux systèmes bi-linéaires et fait l'objet de l'étude présentée dans la section suivante.

5.3.2.2 Structuration des résidus pour l'isolation des défauts de capteurs

Les schémas de génération de résidus du type DOS ou GOS, comme montrés respectivement dans les figures 5.9 et 5.10 ont été largement utilisés dans le cas des systèmes linéaires. L'objectif est de localiser des défauts de capteurs.

Le schéma DOS de la figure 5.9, est construit à partir d'un banc d'estimateur de l'état piloté par une seule des sorties observées du système. Chaque estimateur permet de reconstruire les sorties du système qui sont comparées aux différentes mesures non utilisées pour piloter l'estimateur. Une logique de décision simple permet d'isoler le défaut.

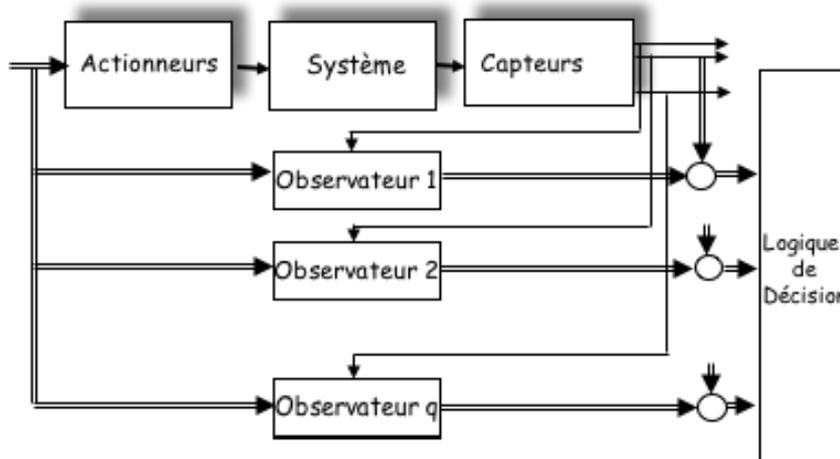


FIGURE 5.9 – Schéma de diagnostic de type DOS

Le schéma DOS impose des conditions d'observabilité plus restrictive que le schéma GOS. Ce

dernier schéma est construit également à partir d'un banc d'observateur, mais cette fois piloté par l'ensemble des mesures, sauf une. Le principe de localisation reste le même.

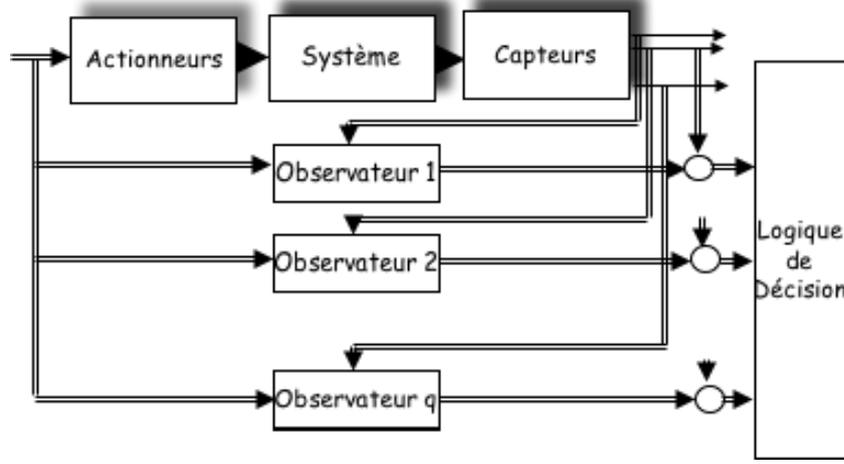


FIGURE 5.10 – Schéma de diagnostic de type GOS

Compte tenu de conditions d'observabilité moins restrictive que pour le schéma DOS, nous préférons appliquer le schéma GOS au modèle bilinéaire du système. On se place dans le cas où le système n'est pas soumis à des entrées de perturbation inconnues et donc avec $E_1 = 0$ la condition (5.53) est satisfaite et la matrice T peut être choisie comme la matrice identité, permettant l'estimation de l'état entier du système. Nous assumons également que les conditions d'observabilité telles qu'énoncées dans [BHS06] sont respectées.

Il s'agit pour chaque observateur de considérer toutes les observations sauf une. A cette fin, nous reprenons avec les conditions (5.51), (5.52) et (5.53) l'équation du système (5.46) qui donne :

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + \sum_{i=1}^p u_k^i D_i x + E_1 d_k^2 + Gf_k^a \quad (5.55)$$

$$y_k = Cx_k + Qf_k^s \quad (5.56)$$

Considérons qu'avec la décomposition $y_k = \begin{bmatrix} \bar{y}_k & \underline{y}_k \end{bmatrix}$ les matrices C et Q s'écrivent sous la forme $C = \begin{bmatrix} \bar{C} & \underline{C} \end{bmatrix}$ et $Q = \begin{bmatrix} \bar{Q} & \underline{Q} \end{bmatrix}$ et en prenant comme sorties mesurées \bar{y}_k il vient pour l'équation de l'observateur :

$$\hat{x}_{k+1} = \bar{H}\hat{x}_k + Bu_k + \bar{L}\bar{y}_k + \sum_{i=1}^p u_k^i D_i \hat{x}_k + \sum_{i=1}^p u_k^i \bar{M}_i \bar{y}_k + E_1 d_k^1 \quad (5.57)$$

et pour l'erreur d'estimation de l'état $e_k = \hat{x}_k - x_k$ il s'en suit :

$$e_{k+1} = \bar{H}e_k - (A - \bar{H} - \bar{L}\bar{C})x_k + \bar{L}Qf_k^s + \sum_{i=1}^p u_k^i D_i e_k + \sum_{i=1}^p u_k^i \bar{M}_i \bar{C} x_k + \sum_{i=1}^p u_k^i M_i Q f_k^s - G f_k^a \quad (5.58)$$

qui avec les conditions :

$$\bar{H} = A - LC \quad (5.59)$$

$$\bar{M}_i \bar{C} = 0 \quad (5.60)$$

donne :

$$e_{k+1} = (\bar{H} + \sum_{i=1}^p u_k^i D_i) e_k + \bar{L}Qf_k^s + \sum_{i=1}^p u_k^i M_i Q f_k^s - G f_k^a \quad (5.61)$$

Cependant, l'erreur d'estimation de l'état dépend de l'entrée appliquée au système et il s'avère nécessaire d'examiner les conditions de convergence de l'erreur d'estimation.

5.9.1.2.a Conditions de convergence

Les conditions de convergence de l'observateur sont étudiées en l'absence de défauts [SJY20]. Pour simplifier, nous considérons la contre-partie en temps continu de l'équation (5.61) :

$$\frac{de(t)}{dt} = \left(\bar{\mathfrak{S}} + \sum_{i=1}^p u^i(t) \mathfrak{D}_i \right) e(t) \quad (5.62)$$

Pour examiner les conditions de convergence de la dynamique de l'erreur d'estimation donnée par (5.62) considérons la fonction de Lyapounov candidate :

$$V(e) = e(t)^T M e(t) \quad (5.63)$$

où M est une matrice symétrique définie positive. La dérivée de V le long de la trajectoire (5.75) suivie par $e(t)$ donne :

$$\dot{V}(e) = \dot{e}(t)^T M e(t) + e(t)^T M \dot{e}(t) \quad (5.64)$$

Il vient :

$$\dot{V}(e) = e(t)^T \left(\bar{\mathfrak{S}}^T M + M \bar{\mathfrak{S}} \right) e(t) + e(t)^T \sum_{i=1}^p u^i(t) \left(\mathfrak{D}_i^T M + \mathfrak{D}_i M \right) e(t) \quad (5.65)$$

Si on considère que la matrice $\bar{\mathfrak{S}}$ obtenue par placement de pôle est Hurwitz , avec \mathfrak{E} qui est une matrice définie positive telle que $\bar{\mathfrak{S}}^T M + M \bar{\mathfrak{S}} = -\mathfrak{E}$, on a :

$$e(t)^T \left(\bar{\mathfrak{S}}^T M + M \bar{\mathfrak{S}} \right) e(t) \leq \lambda_{\min} \left(\bar{\mathfrak{S}}^T M + M \bar{\mathfrak{S}} \right) e(t)^T e(t) \quad (5.66)$$

De plus avec :

$$e(t)^T \sum_{i=1}^p u^i(t) \left(\mathfrak{D}_i^T M + \mathfrak{D}_i M \right) e(t) \leq 2\lambda_{\max} \left(\mathfrak{D}_i^T M + \mathfrak{D}_i M \right) \|u\| e(t)^T e(t) \quad (5.67)$$

il vient comme condition de convergence asymptotique de l'observateur :

$$\|u\| < \frac{\lambda_{\min} \left(\overline{\mathfrak{G}}^T M + M \overline{\mathfrak{G}} \right)}{2\lambda_{\max} \left(\mathfrak{D}_i^T M + \mathfrak{D}_i M \right)} \quad (5.68)$$

5.3.2.3 Structuration des résidus pour l'isolation des défauts d'actionneurs

Pour détecter et isoler les défaut, on propose de construire un banc d'observateurs à entrées inconnues. Chaque observateur est piloté par l'ensemble des entrées, sauf une. En présence d'un défaut d'actionneur j , seuls les résidus calculés à partir de l'observateur dont la $j^{\text{ème}}$ entrée est considérée comme inconnue est nulle, tous les autres résidants étant différents de zéros. Ainsi pour le système décrit par l'équation (5.46) dans laquelle l'expression des défauts et les entrées de perturbations sont omises est l'équation du système peut se mettre sous la forme :

$$x_{k+1} = Ax_k + \overline{B}_j \overline{u}_k + \sum_{i=1, i \neq j}^p u_k^i D_i x + \left(\underline{B}_j + D_j x \right) u_k^j \quad (5.69)$$

$$y_k = Cx_k \quad (5.70)$$

où \overline{B}_j est obtenue en retirant la $j^{\text{ème}}$ colonne dans B , \underline{B}_j désigne la $j^{\text{ème}}$ colonne de B et \overline{u}_k représente le vecteur d'entrée auquel a été retirée la $j^{\text{ème}}$ composante.

Ainsi le terme $(\underline{B}_j + D_j x) u_k^j$ peut il être considéré comme une entrée inconnue au même titre que d_k^2 dans (5.46.a). Nous écrivons :

$$E_2 d_k^2 = \left(\underline{B}_j + D_j x \right) u_k^j$$

En reprenant l'équation (5.47), l'observateur à entrée inconnue est donné par :

$$z_{k+1} = Hz_k + Bu_k + Ly_k + \sum_{i=1, i \neq j}^p u_k^i D_i' z_k + \sum_{i=1, i \neq j}^p u_k^i M_i y_k \quad (5.71)$$

conduisant aux conditions suivantes de réalisation :

$$TA - HT = LC \quad (5.72)$$

$$D_i' T - TD_i + M_i C = 0 \quad (5.73)$$

$$T(\underline{B}_j + D_j x) = 0 \quad (5.74)$$

et l'erreur d'estimation ou résidu suivant $e_k = z_k - Tx_k$ qui avec $D_i' = 0$ satisfait à :

$$e_{k+1} = He_k$$

qui converge vers zéro si la matrice H est Hurwitz, montrant ainsi que l'erreur d'estimation de l'état serait insensible à la présence d'un défaut sur l'actionneur j . Comme nous le montrerons ultérieurement la résolution de l'équation (5.74) qui a priori n'est pas triviale, se simplifie grandement dans le cas de l'application bâtiment qui nous intéresse compte-tenu de la structure des matrices D_j comportant beaucoup de zéros.

5.3.2.4 Reconfiguration du contrôle

Nous examinons à présent l'occurrence d'un défaut d'actionneur. Si l'on considère que le défaut est de type additif, alors l'entrée inconnue de l'équation (5.46) s'exprime sous la forme :

$$G(x)f_k^{aj} = (b_j + D_j x_k) f_k^{aj} \quad (5.75)$$

où f_k^{aj} représente par exemple la perte d'efficacité de l'actionneur et $b_j = Col_j(B)$ et D_j désignent l'actionneur en défaut.

Dans la suite, pour ne pas alourdir les développements, les entrées de perturbation seront omises. Le système est maintenant récrit sous la forme compacte

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + (B + [D_1 x_k, \dots, D_p x_k]) u_k + (b_j + D_j x_k) f_k^{aj} \\ &= Ax_k + R(x)u_k + G(x)f_k^{aj} \end{aligned} \quad (5.76)$$

$$y_k = Cx_k \quad (5.77)$$

Pour compenser le défaut, nous proposons dans un premier temps, comme pour le cas linéaire d'ajouter à chaque entrée de commande un terme additif $\Delta u_k = [\Delta u_k^i \dots \Delta u_k^p]$ ayant pour objet de compenser l'impact du défaut, en sorte que :

$$R(x)\Delta u_k + G(x)\hat{f}_k^{aj} = 0 \quad (5.78)$$

il vient :

$$\Delta u_k = -R(x)^+ G(x)\hat{f}_k^{aj} \quad (5.79)$$

où $R(x)^+$ désigne la pseudo inverse gauche de $R(x)$ et \hat{f}_k^{aj} représente une estimation du défaut j à l'instant j . Cependant comme nous le verrons plus loin, la résolution de (5.78) peut conduire à une solution triviale, par exemple $\Delta u_k^i = \hat{f}_k^{aj}$.

Pour compenser le $j^{\text{ème}}$ défaut, il est préférable de reporter l'effort sur l'ensemble des actionneurs sains et donc, si l'on considère un défaut sur le $j^{\text{ème}}$ actionneur, de résoudre (5.78) avec :

$$R(x) = \bar{B}_j + [D_1 x_k \dots D_{i \neq j} x_k \dots D_p x_k] \quad (5.80)$$

Il nous reste à déterminer une estimation du défaut pour la réinjecter dans (5.79). En présence d'un défaut d'actionneur, l'erreur d'estimation prend avec (5.75) la forme de l'équation (5.54) :

$$e_{k+1} = He_k + G(x)f_k^{aj} \quad (5.81)$$

En l'absence d'une modélisation de la propagation du défaut il n'est pas possible déterminer \hat{f}_k^{aj} . En revanche une estimation retardée de l'effet du défaut peut être donnée sous la forme :

$$G(x)\hat{f}_{k/(k+1)}^{aj} = e_{k+1} - He_k$$

mais ne peut être déterminée en temps réel. Pour pallier ce problème, nous assumerons dans la suite que le défaut suit une marche aléatoire de la forme :

$$f_{k+1}^{aj} = f_k^{aj} + w(k) \quad (5.82)$$

où $w(k)$ est un bruit blanc obéissant à une loi normale de moyenne nulle et de variance connue. Dans ces conditions, on peut estimer l'effet du défaut sous la forme :

$$G(x)\hat{f}_{k/k}^{aj} = e_k - He_{k-1} \quad (5.83)$$

5.4 Application au système à énergie renouvelable

Pour l'application du diagnostic de défauts et de la commande tolérante aux défauts, on retrouve les approches centralisées (figure 5.11), décentralisées (figure 5.12) et distribuées (figure 5.13) précédemment discutées pour la commande MPC. Nous retenons toujours une approche distribuée selon la décomposition montrée dans figure 5.14 et nous traitons plusieurs types de défauts pouvant affecter chaque sous système dans l'ordre bâtiment, pompe à chaleur et micro réseau.

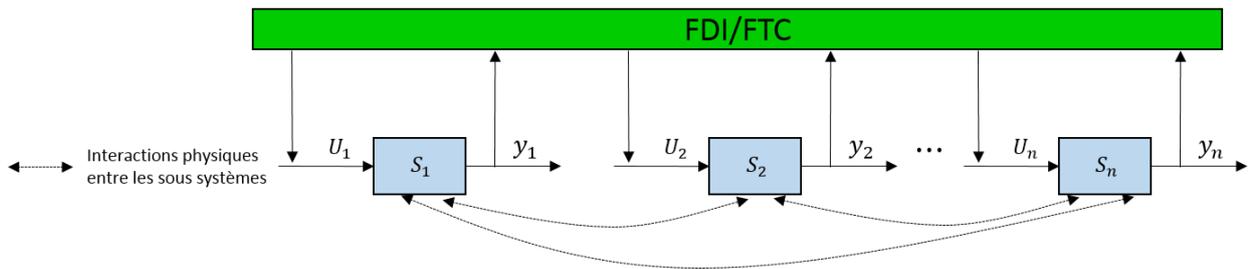


FIGURE 5.11 – Architecture FDI/FTC centralisée

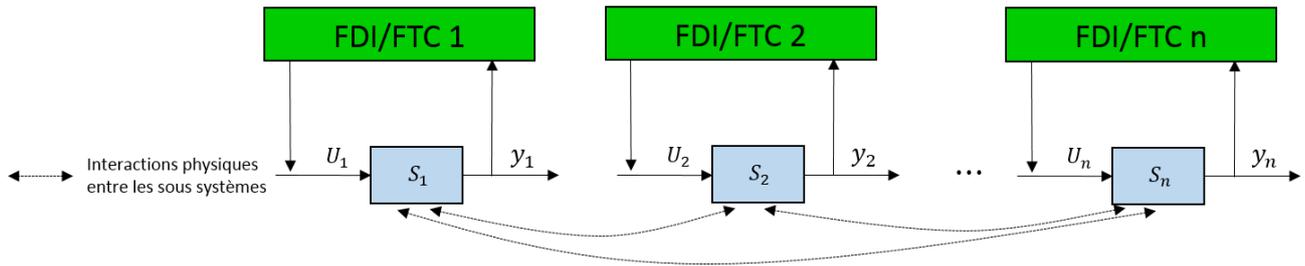


FIGURE 5.12 – Architecture FDI/FTC décentralisée

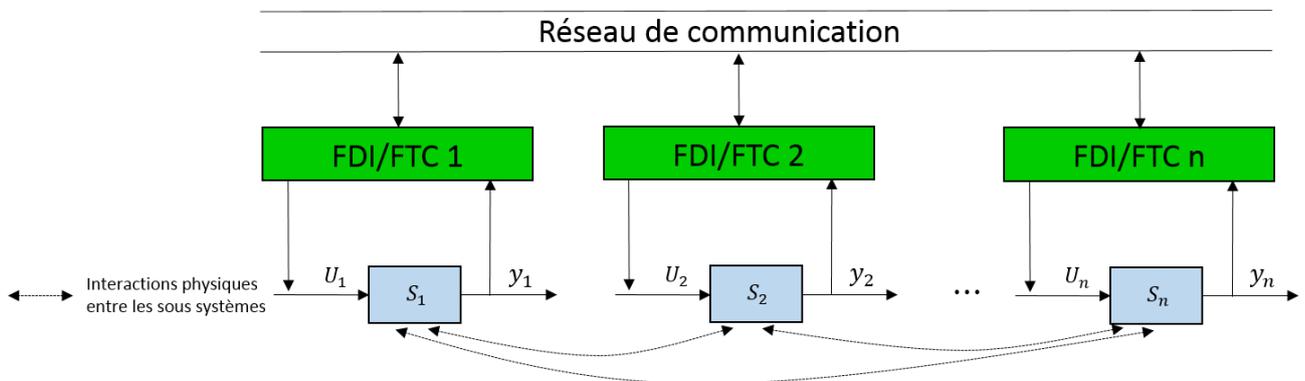


FIGURE 5.13 – Architecture FDI/FTC distribuée

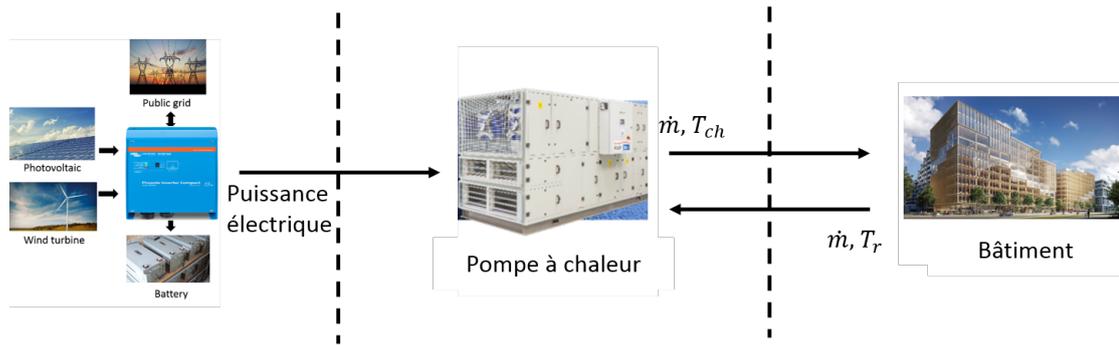


FIGURE 5.14 – Décomposition du système selon une architecture distribuée

5.4.1 Application du filtre linéaire à un bâtiment multizone

On reprend le modèle linéaire du bâtiment à trois zones qui s'écrit :

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Ed_k + v_k \\ y_k &= Cx_k + w_k \end{aligned} \quad (5.84)$$

Où on introduit v_x et w_x qui représentent respectivement les vecteurs de bruit du système et de mesure qui sont supposés être du bruit blanc gaussien, avec une moyenne nulle et des matrices de covariance connues.

À titre d'illustration, un défaut de blocage dans le registre qui contrôle le débit d'air dans la zone 1 a été appliqué au moment $k=20$. Une fois que l'indicateur de défaut $\alpha_i(k)$ franchit un seuil donné, le défaut est détecté et isolé. La figure 5.15 montre le signal d'entrée de la défaillance et de son estimation.

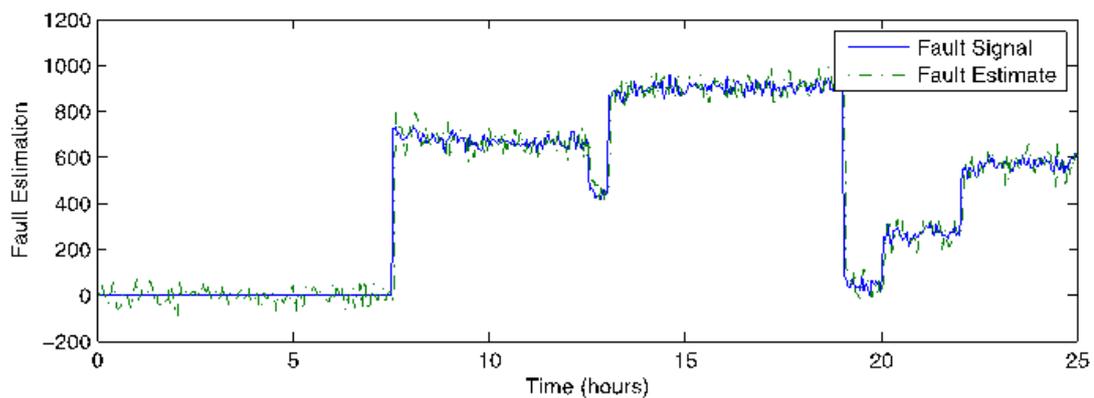


FIGURE 5.15 – Estimation du défaut de l'entrée

après la détection d'un défaut, le système FTC passe du régulateur nominal au régulateur reconfiguré, ce qui vise à redistribuer l'effort de contrôle vers les actionneurs sûrs. La figure 5.16 montre la réponse des températures ambiantes à la défaillance du registre tandis que la figure

5.17 permet de voir comment les efforts de contrôle sont redistribués entre les actionneurs de sécurité. Il est évident que la température de la zone 1 est la plus sensible au défaut. Les résultats de la simulation montrent qu'il est possible de récupérer une température dans la zone 1 proche de la référence.

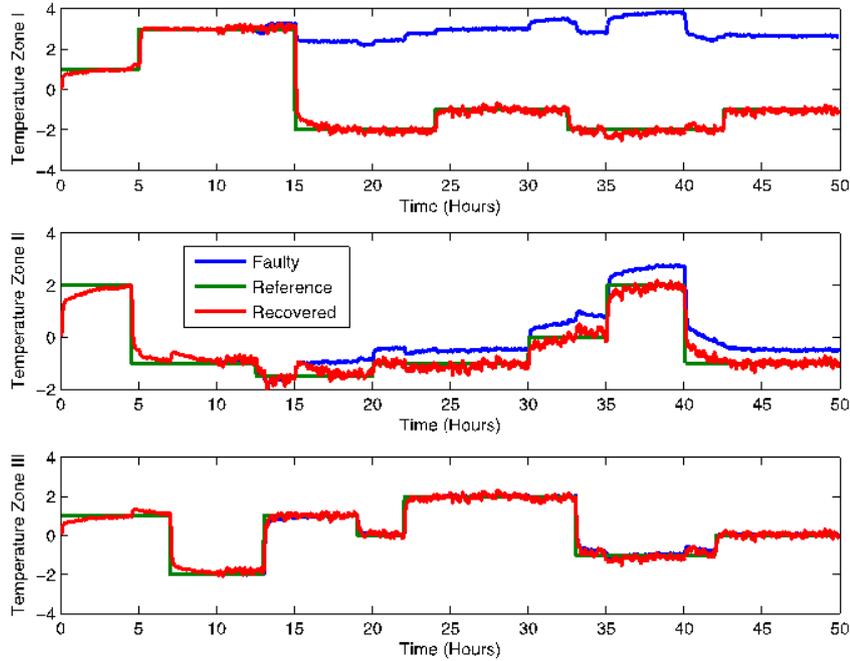


FIGURE 5.16 – Control reconfiguration

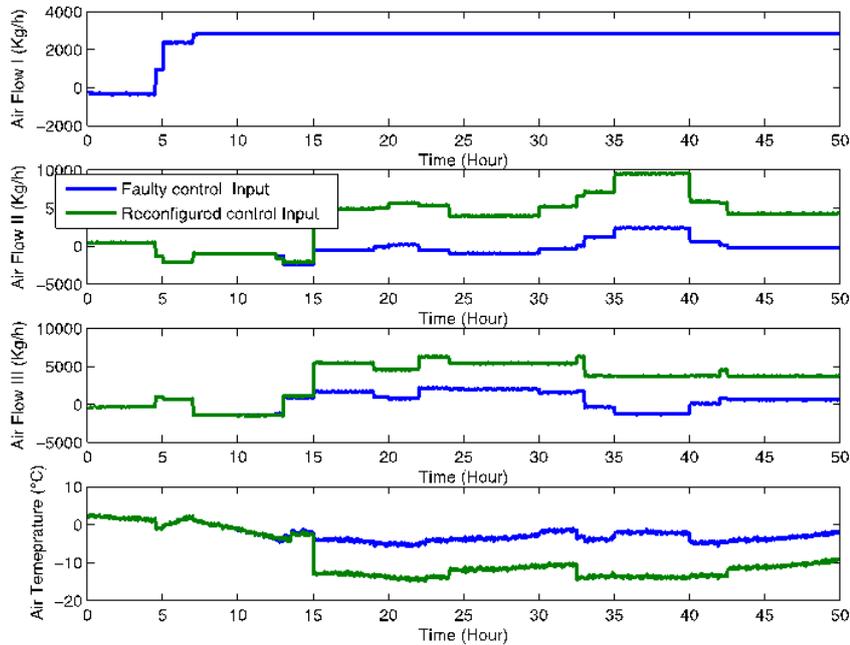


FIGURE 5.17 – Actions de commande dans le cas nominal et après reconfiguration

5.4.2 Application de l'observateur bilinéaire à un bâtiment multizone

Avant de montrer les résultats de diagnostic qu'offre une approche bi-linéaire, intéressons nous tout d'abord à l'intérêt de celle-ci par rapport à l'approche linéaire. Les figures suivantes permettent de comparer ces deux approches. La figure 5.18 montre la température mesurée de la zone 1 et son estimation à partir d'un observateur, respectivement dans le cas linéaire (figure supérieure) et dans le cas bi-linéaire (figure inférieure). Dans le cas linéaire, comme le montre la figure 5.19, le résidu s'écarte de zéro, selon les conditions opératoires, ce qui pourrait justifier d'utiliser un seuillage adaptatif pour le diagnostic [JS20].

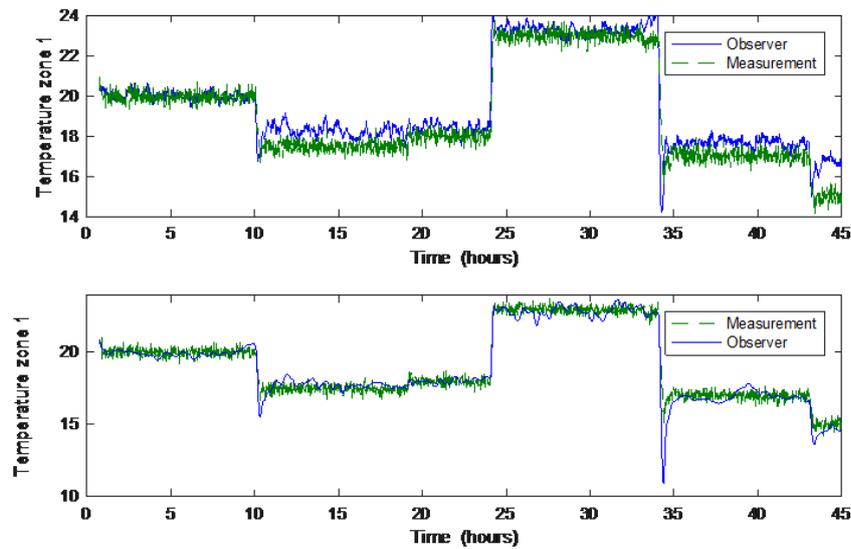


FIGURE 5.18 – Mesures et estimations de la température zone 1

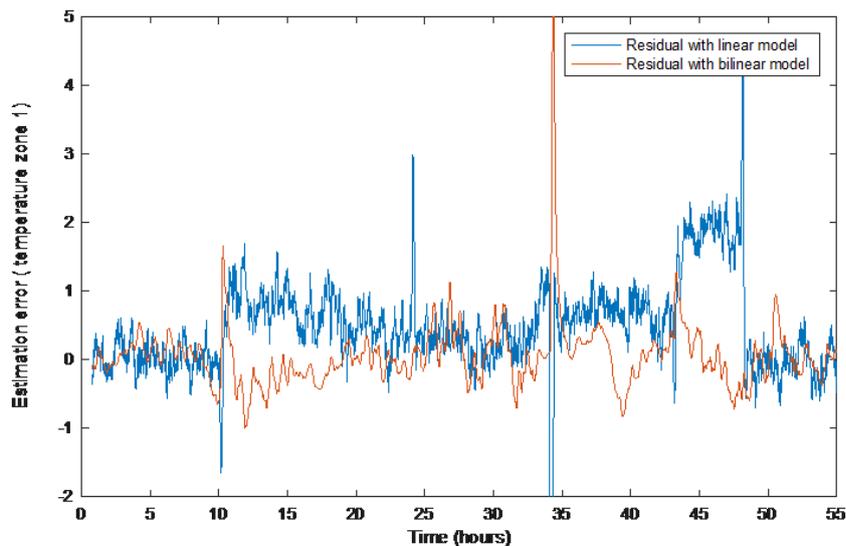


FIGURE 5.19 – Résidus générés à partir d'un modèle linéarisé et à partir d'un modèle bi-linéaire

5.4.2.1 Diagnostic défaut capteur

Pour le diagnostic de défaut de capteur nous proposons d'adopter un schéma de type Dedicated Observer (DOS). Chaque observateur i est piloté par la mesure de température T_i et permet de déterminer les estimations des températures T_j pour générer des résidus r_{ij} . Pour valider ce schéma plusieurs défauts (biais d'amplitude 1°C) de durée finie (10 heures) ont été appliqués aux capteurs de température du bâtiment, affectant respectivement la mesure de la température zone 1 à $t = 20$, puis la température de zone 2 à $t=40$, enfin la température de zone 3 à $t= 60$.

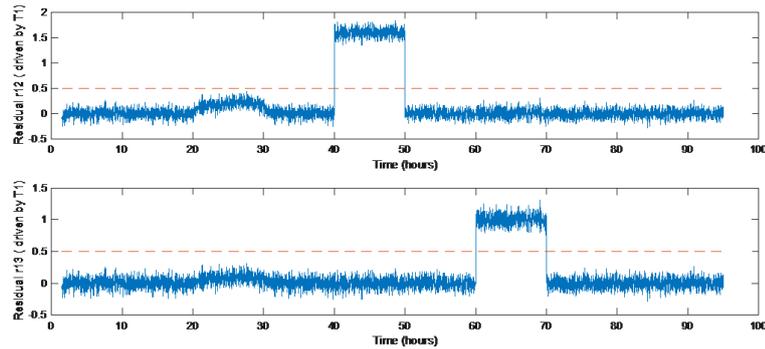


FIGURE 5.20 – Résidus générés par un observateur dédié piloté par T_1 (DOS 1)

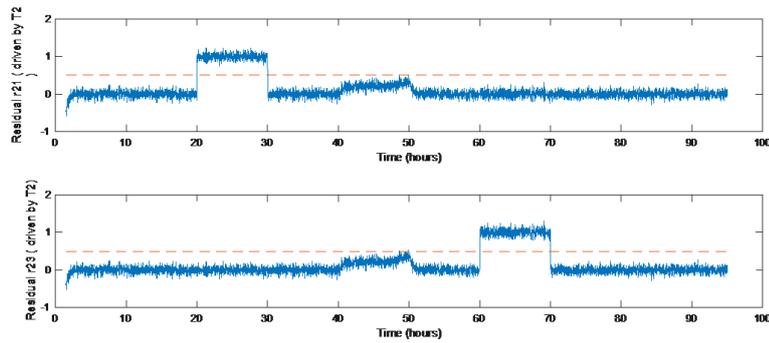


FIGURE 5.21 – Résidus générés par un observateur dédié piloté par T_2 (DOS 2)

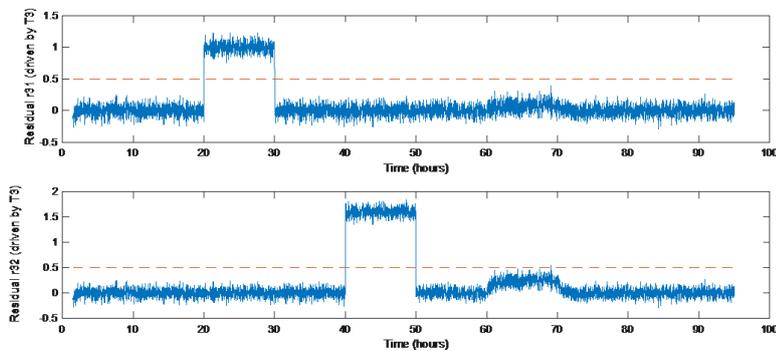


FIGURE 5.22 – Résidus générés par un observateur dédié piloté par T_3 (DOS 3)

Pour la localisation d'un défaut de capteur une logique simple élaborée à partir de la matrice de signature suivante peut être développée.

Signature défauts		T_1	T_2	T_3
DOS 1	Résidu 12	0	1	0
	Résidu 13	0	0	1
DOS2	Résidu 21	1	0	0
	Résidu 22	0	0	1
DOS 3	Résidu 31	1	0	0
	Résidu 32	0	1	0

5.4.2.2 Diagnostic défaut actionneur

Pour les défauts d'actionneurs, une stratégie de diagnostic similaire à la précédente a été adoptée. Un banc d'observateur à entrée inconnue a été mis en œuvre. Chaque observateur est piloté par deux entrées et permet de reconstruire deux sorties. Pour valider cette approche, nous avons simulé une perte d'efficacité sur chacun des actionneurs. Les figures suivantes montrent qu'avec une logique simple il est possible de localiser un défaut actionneur.

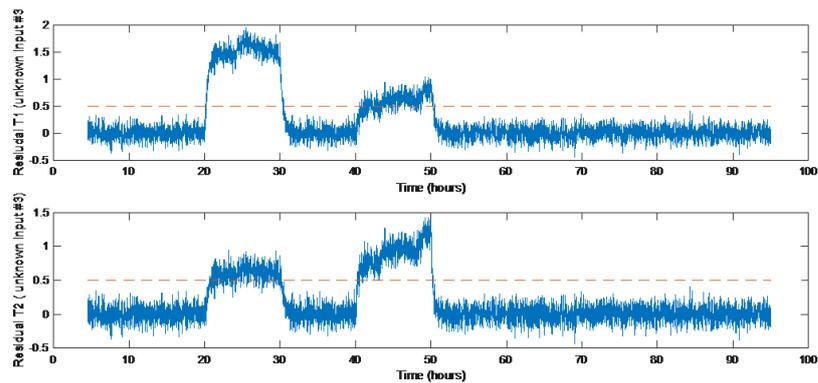


FIGURE 5.23 – Résidus générés par un observateur (entrée inconnue 3)

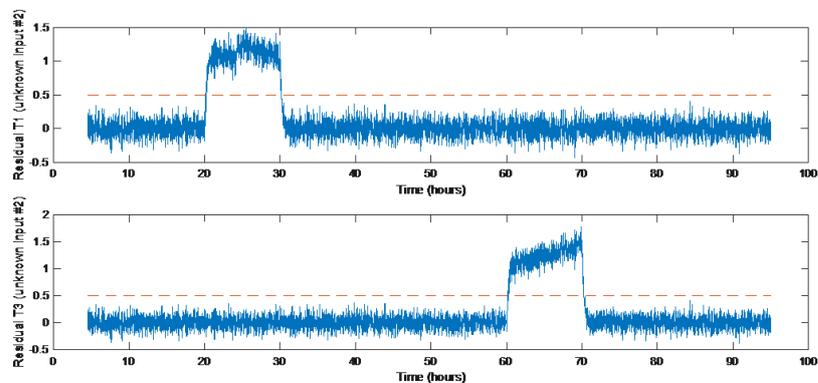


FIGURE 5.24 – Résidus générés par un observateur (entrée inconnue 2)

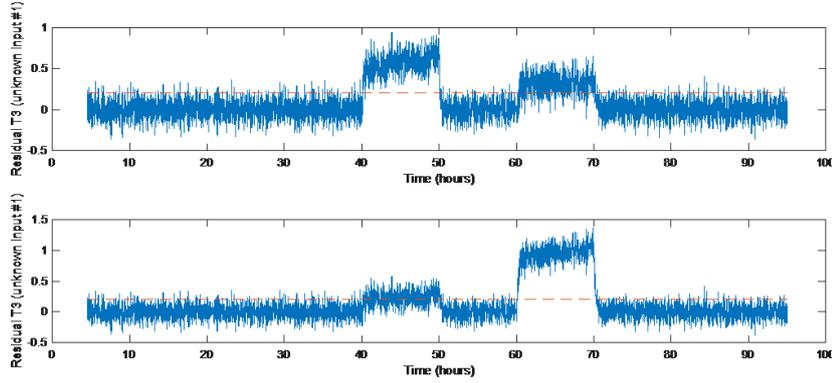


FIGURE 5.25 – Résidus générés par un observateur (entrée inconnue 1)

5.4.2.3 Compensation des défauts actionneur

Pour illustrer cette problématique, nous prenons l'exemple d'un bâtiment à deux zones pour lequel en reprenant la modélisation de la section 3.7.2, avec le vecteur d'état $x = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_h \end{bmatrix}$ et le

vecteur des entrées de commandes $u = \begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ v \end{bmatrix}$, le modèle d'état du système s'écrit :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{11} & a_{11} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{-1}{M_1} (T_1 - T_h) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{M_2} (T_2 - T_h) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ v \end{bmatrix} \quad (5.85)$$

Le problème exposé en 5.3.2.4 se réduit considérablement si l'on place en régime statique. Si l'on suppose que l'actionneur de débit \dot{m}_2 est en défaut, en prenant l'exemple d'une perte d'efficacité qui s'exprime sous la forme la forme d'un terme additif $-\alpha\dot{m}_2$, $0 < \alpha < 1$ le modèle du système se réécrit :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & 0 \\ a_{11} & a_{11} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{-1}{M_1} (T_1 - T_h) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{M_2} (T_2 - T_h) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ (1 - \alpha)\dot{m}_2 \\ v \end{bmatrix} \quad (5.86)$$

on peut pour compenser l'effet du défaut sur l'état agir sur les commandes de débit \dot{m}_1 et la commande de température d'air soufflé v et donc aussi sur la température de l'air soufflée. En suivant le raisonnement de la section 5.3.2.4, il s'agit de déterminer les signaux additifs à appliquer à $\Delta\dot{m}_1$ et ΔT_h pour compenser ce défaut. A noter que ΔT_h n'est pas une entrée de commande sur laquelle on peut agir directement, mais que l'équation d'état (5.85) pouvant se décomposer en 2 sous-systèmes quasi découplés, il est possible de simplifier ainsi la résolution du problème qui se ramène à la résolution du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{-1}{M_1} (T_1 - (T_h + \Delta T_h)) (\dot{m}_1 + \Delta\dot{m}_1) = \frac{-1}{M_1} (T_1 - T_h) \dot{m}_1 \\ \frac{-1}{M_2} (T_2 - (T_h + \Delta T_h)) (\dot{m}_2 + \alpha\dot{m}_2) = \frac{-1}{M_2} (T_2 - T_h) \dot{m}_2 \end{cases} \quad (5.87)$$

avec, en considérant uniquement le régime statique : $\Delta T_h = \frac{A}{\tau} \Delta v$, il vient :

$$\begin{cases} \Delta \dot{m}_1 = \alpha \dot{m}_1 \\ \Delta T_h = \alpha T_h \end{cases} \quad (5.88)$$

$$\Delta v = \alpha v$$

L'extension à un cas de dimension plus grande n'engendre pas de difficulté particulière, le principe de répartition des efforts restant le même. Afin d'appliquer cette méthode de reconfiguration, il faut disposer d'une estimation du défaut, déterminé pour le système (5.86) à partir de (5.85) avec $G(x) = \frac{11}{M_2} (T_2 - T_h) \dot{m}_2$ et dans le cas d'une perte d'efficacité sur l'actionneur de débit on a : $f_k^2 = -\alpha \dot{m}_2$ et la figure 5.26 montre les résultats obtenus pour l'estimation de la perte d'efficacité. Sur cette figure nous avons simulé une perte d'efficacité de 20% à $t = 20$ suivie d'une perte d'efficacité de 40% à $t = 50$

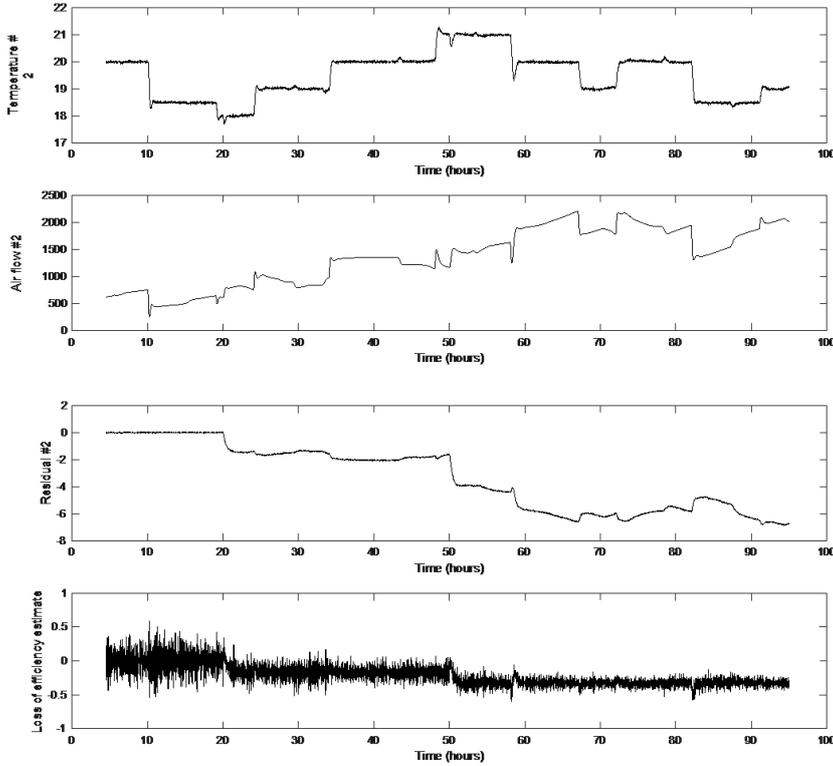


FIGURE 5.26 – Estimation d'une perte d'efficacité d'un actionneur de débit air

Comme le montre la figure précédente (5.26), une perte d'efficacité est compensée par la régulation qui de fait augmente l'amplitude de l'action (dans le cas du bâtiment le débit de l'air pulsé) afin de maintenir la température de zone proche de la température de consigne. En pratique le débit ne peut pas être augmenté indéfiniment sans subir de saturation pouvant conduire à une instabilité comme le montre la figure 5.27. Dans cet exemple une perte d'efficacité de 40% a été appliquée à $t=20$. A noter que le phénomène de saturation, n'apparaît pas nécessairement à l'instant du défaut. Il dépend de l'amplitude du signal de commande qui lui même dépend de la consigne. Dans l'exemple ci-dessus la saturation n'apparaît qu'après $t=55$, quand la consigne

a dépassé une valeur de 23°C. Le seuil de saturation a été fixé pour le débit d'air à la valeur de 3000kg/h, par rapport à un débit nominal d'environ 1800 kg/h.

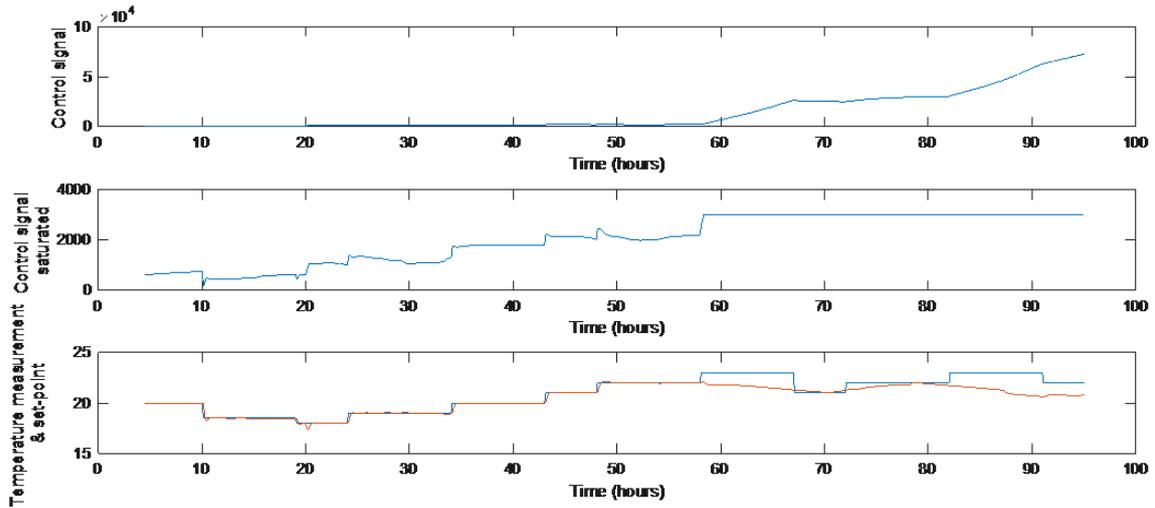


FIGURE 5.27 – Phénomène de saturation lié à la perte d'efficacité

Pour éviter cette saturation de la commande, due à une perte d'efficacité, il est possible d'agir sur la température de l'air pulsé, comme proposé par l'équation (5.88). La figure 5.28 montre les résultats obtenus après qu'une perte d'efficacité de 40% soit apparue à $t=20$, puis compensée à $t=25$.

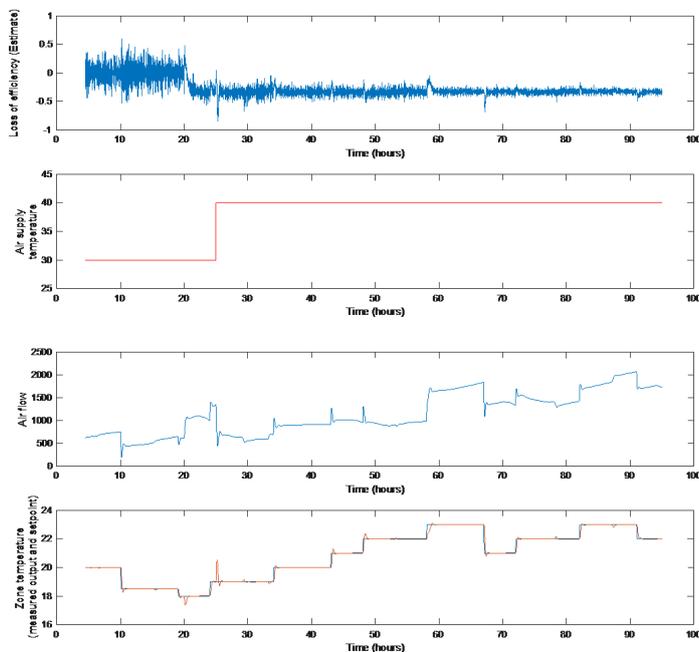


FIGURE 5.28 – Reconfiguration de la commande contre la perte d'efficacité de l'actionneur

5.4.3 Défaut capteur de température du bâtiment

Nous considérons un défaut du capteur qui mesure la température interne du bâtiment. Le modèle initial du bâtiment est :

$$x_b(k+1) = A_b x_b(k) + B_b u_b(k) + E_b d_b(k) \quad (5.89)$$

$$y_b(k) = C_b x_b(k) \quad (5.90)$$

Avec le défaut capteur le modèle devient :

$$x_b(k+1) = A_b x_b(k) + B_b u_b(k) + E_b d_b(k) \quad (5.91)$$

$$y_b(k) = C_b x_b(k) + f_s(k) \quad (5.92)$$

Par conséquent, le modèle mis en œuvre dans le filtre de Kalman est :

$$\begin{bmatrix} x_b(k+1) \\ f_s(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_b & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b(k) \\ f_s(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_b \\ 0 \end{bmatrix} u_b(k) + \begin{bmatrix} E_b \\ 0 \end{bmatrix} d_b(k) \quad (5.93)$$

$$y_b(k) = \begin{bmatrix} C_b & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b(k) \\ f_s(k) \end{bmatrix} \quad (5.94)$$

La valeur de la température mesurée envoyée par le capteur au contrôleur MPC est inférieure à la valeur réelle de 5°C. Cette information biaisée conduit le contrôleur à augmenter la régulation pour atteindre la référence, alors que la température mesurée atteint la référence, la valeur réelle de la température dans le bâtiment a dépassé la référence comme le montre la figure 5.29

Pour résoudre ce problème, la température mesurée par le capteur est comparée à la valeur

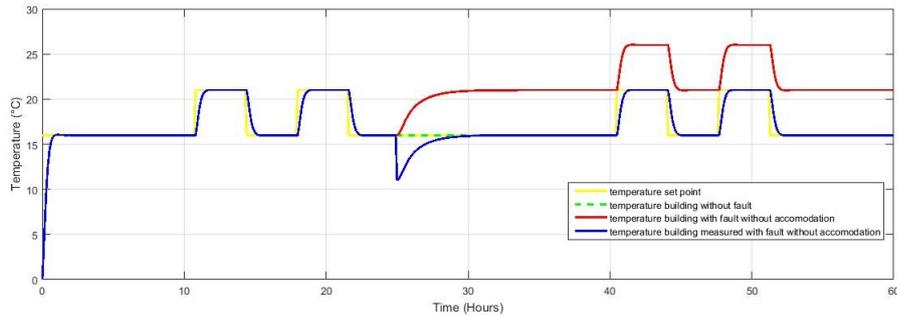


FIGURE 5.29 – Différentes températures avec défaut capteur avant accommodation

estimée par le modèle du bâtiment, quand un décalage apparaît et persiste, un filtre de Kalman est inclus pour estimer la température interne du bâtiment, et le contrôleur reçoit la bonne valeur et prend la bonne décision, pour finalement donner une température interne égale à la référence et une température mesurée en dessous de la référence à cause du défaut capteur (figure 5.30) [JSA19].

La Figure 5.31 montre les actions de contrôle dans les différentes situations.

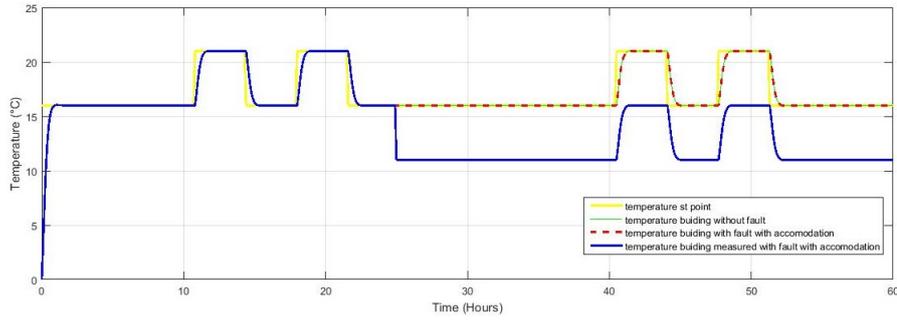


FIGURE 5.30 – Différentes températures avec défaut capteur après accommodation

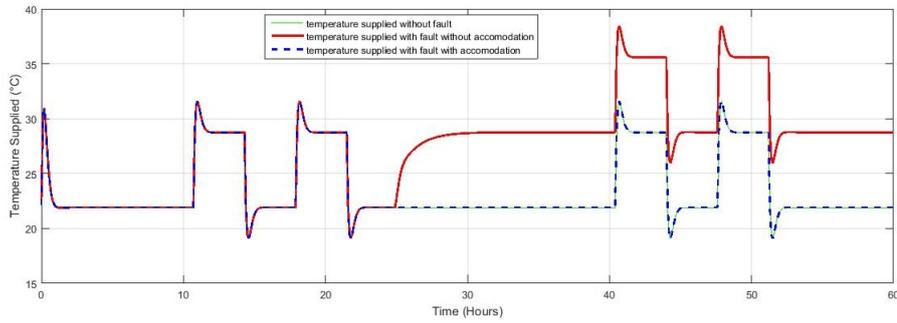


FIGURE 5.31 – Commandes en cas nominal et avec défaut avant et après accommodation

5.4.4 Défaut actionneur pompe à chaleur

Nous considérons maintenant un défaut de la pompe à chaleur dont le modèle initial est :

$$x_p(k+1) = A_p x_p(k) + B_p u_p(k) + E_p d_p(k) \quad (5.95)$$

$$y_p(k) = C_p x_p(k) \quad (5.96)$$

où

$$\begin{aligned} x_p(k) &= [T_{ch}(k)] \\ u_p(k) &= [S(k)]^T \\ d_p(k) &= [T_m(k) \quad T_{ext}(k)]^T \\ y_p(k) &= [T_{ch}(k)] \end{aligned}$$

sont respectivement les états, la commande (entrée contrôlable), entrées non contrôlables mais mesurables et la sortie.

Dans les mêmes conditions de fonctionnement (même température de l'air extérieur et même signal de commande), la température de l'air fourni (soufflé dans la zone) par la pompe à chaleur dont les performances sont dégradées est inférieure à la température de l'air fourni par la pompe

à chaleur sans défaut. Pour fournir de l'air à la même température, il est nécessaire d'augmenter la valeur du signal de commande et donc la puissance consommée par la pompe à chaleur.

Le contrôleur MPC, pour calculer la séquence de commande optimale utilise un modèle du système, cependant un défaut de la pompe à chaleur est représentée par un changement des paramètres du système réel, cette différence entre le modèle utilisé par le MPC et le système réel fait que la séquence de contrôle n'est pas nécessairement la meilleure. L'action d'accommodation à effectuer est la modification des paramètres du modèle utilisé par le MPC, de sorte qu'il soit identique au système. Pour ce faire, la température réelle fournie est comparée à la température estimée fournie par le modèle de la pompe à chaleur, lorsqu'un décalage apparaît et persiste, un filtre de Kalman est inclus pour estimer le nouveau paramètre interne [JSA19].

Le défaut de la pompe à chaleur affecte le gain de la matrice B_p , une perte d'efficacité de 30 % est considérée. Pour tenir compte de ce défaut de l'actionneur le modèle de la pompe à chaleur est linéarisé et devient :

$$\tilde{x}_p(k+1) = \tilde{A}_p \tilde{x}_p(k) + \tilde{B}_p \tilde{u}_p(k) + \tilde{F}_p \tilde{\mu}_p(k) + \tilde{E}_p \tilde{d}_p(k) \quad (5.97)$$

$$\tilde{y}_p(k) = C_p \tilde{x}_p(k) \quad (5.98)$$

Par conséquent, le modèle mis en œuvre dans le filtre de Kalman est :

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_p(k+1) \\ \tilde{\mu}_p(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_p & \tilde{F}_p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_p(k) \\ \tilde{\mu}_p(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}_p \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{u}_p(k) + \begin{bmatrix} \tilde{E}_p \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{d}_p(k) \quad (5.99)$$

$$\tilde{y}_p(k) = \begin{bmatrix} C_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_p(k) \\ \tilde{\mu}_p(k) \end{bmatrix} \quad (5.100)$$

La figure 5.32 montre la température dans le bâtiment en fonctionnement normal et en présence d'un défaut de la pompe à chaleur avant et après accommodation, et la figure 5.33 montre leurs signaux de contrôle respectifs.

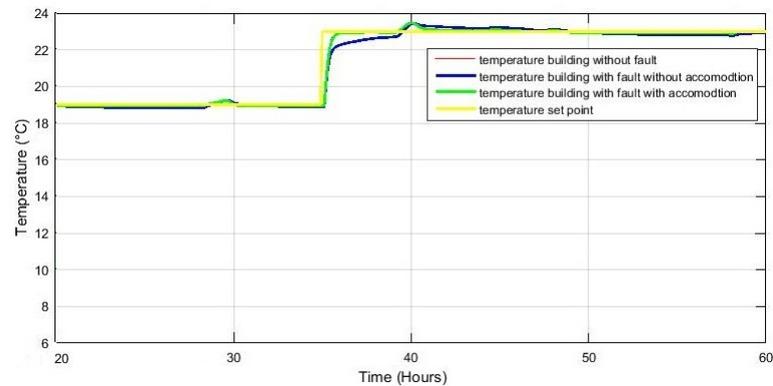


FIGURE 5.32 – Température de chauffage en fonctionnement normal et en présence de défaut avant et après accommodation

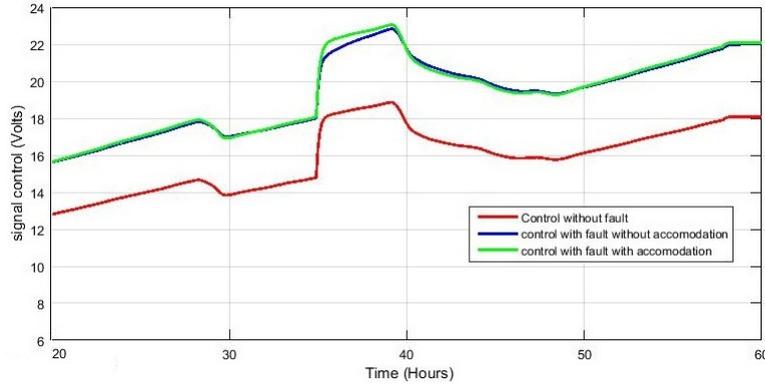


FIGURE 5.33 – Commande en fonctionnement normal et en présence de défaut avant et après accommodation

On peut constater que le signal de commande après accommodation est légèrement différent du signal de commande avant accommodation (presque la même consommation d'énergie); cependant, la régulation est bien meilleure et proche de la régulation sans défaut.

5.4.5 Défaut procédé batteries de stockage

Dans cette section on considère le sous système micro-réseau dont le modèle développé dans le chapitre précédent est :

$$SoC(k+1) = SoC(k) + \begin{bmatrix} \Delta t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_b(k) \\ P_g(k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} SoC(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} SoC(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_b(k) \\ P_g(k) \end{bmatrix}$$

Et dont le problème d'optimisation dans le contrôleur MPC est :

$$J = \alpha \sum_{i=1}^{H_p} (P_b(i) + P_g(i) + P_{pv}(i) + P_{wt}(i) - P_l(i))^2 + \beta_1 \sum_{i=0}^{H_u} (P_b(i))^2 + \beta_2 \sum_{i=0}^{H_u} (P_g(i))^2$$

sous les contraintes :

- $P_b \leq P_b \leq \overline{P_b}$
- $\underline{SoC} \leq SoC \leq \overline{SoC}$

Dans ce sous système les batteries sont l'élément le plus faible, plusieurs facteurs tels que la surcharge, la décharge profonde, le démarrage à basse température pourraient conduire à un vieillissement accéléré. Certaines recherches discutent du processus de vieillissement à travers

des paramètres externes, d'autres à travers le mécanisme de vieillissement interne [WZG17], la principale conséquence de ce vieillissement accéléré est la dégradation de la capacité de la batterie.

Cette dégradation est représentée dans notre travail par une saturation de l'état de charge de la batterie SoC . Le bloc de diagnostic des défauts du système de surveillance compare la mesure du SoC des batteries physiques avec le SoC du modèle de batterie, par conséquent, toute saturation de la capacité des batteries est détectée et estimée. Cette valeur de saturation est utilisée par le bloc de re-configuration du contrôleur pour modifier le contrôleur MPC, ce défaut est bien et suffisamment pris en compte en resserrant la contrainte $SoC \leq \overline{SoC}$ en remplaçant la valeur nominale \overline{SoC} par la valeur de saturation \overline{SoC}_{sat} [JSA19].

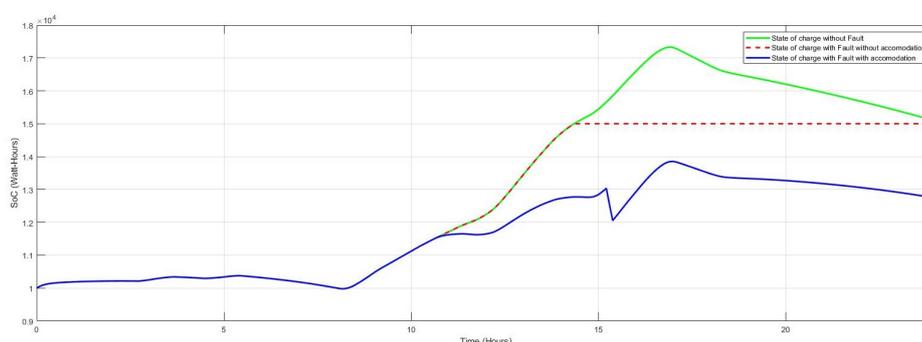


FIGURE 5.34 – État de charge en fonctionnement nominal et en présence de défaut avant et après re-configuration

Dans cette simulation, une perte de 30% de la capacité de charge des batteries a été considérée, soit 15000 Wh au lieu de 21120 Wh. On peut voir sur la figure 5.34 qu'après re-configuration, le contrôleur prend en considération la nouvelle contrainte concernant l'état de charge maximal, il ne l'atteint pas en envoyant moins de puissance à la batterie et plus de puissance au réseau public, contrairement au cas avant re-configuration où le contrôleur essaie toujours d'envoyer de la puissance à la batterie plutôt qu'au réseau malgré le fait que la batterie est saturée, ce qui pourrait présenter des risques dans le micro-réseau.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale un résumé de l'état de l'art sur les principes de base du diagnostic de défauts et de commande tolérante aux défauts. En effet nous avons rappelé quelques définitions et nous avons exposé un panorama assez complet des principales méthodes de diagnostic. Les techniques décrites ici sont les plus connues et les plus couramment utilisées. Nous avons ensuite mis en œuvre un observateur capable d'estimer les défauts. Les informations sur les défauts délivrées par le système de diagnostic peuvent désormais être exploitées par la loi de commande tolérante aux défauts. Celle-ci est basée sur une actualisation instantanée du modèle, et contraintes indispensables pour sa formulation. Et en fin deux nouveaux filtres ont été proposés et appliqués, le premier dans le cas d'un système linéaire et le deuxième dans le cas bi-linéaire.

Chapitre 6

Conclusion générale

Ce travail a été consacré en premier lieu à la conception de la commande prédictive (MPC) pour la gestion de l'énergie dans les bâtiments. D'une part pour la gestion des flux de puissance dans le micro-réseau intégré au bâtiment et d'autre part pour la régulation de température des zones constituant le bâtiment.

La difficulté de la mise en œuvre de la commande prédictive est la nécessité d'un bon modèle du processus à contrôler et une connaissance a priori des signaux de référence (consignes) sur un horizon de prédiction futur.

Une grande importance a été donnée à la problématique de la modélisation dans le chapitre 3. Du côté production/stockage nous avons développé :

- Un modèle permettant de prédire la vitesse du vent futur sur un horizon de prédiction. Ce vecteur de valeurs futures de la vitesse du vent appliqué à l'entrée du modèle de l'éolienne permet d'avoir la puissance prédite produite par l'éolienne.
- De même un modèle des panneaux photovoltaïques complété par un modèle de prédiction du rayonnement solaire futur incident sur les panneaux permet de prédire la puissance produite par les panneaux photovoltaïques sur un horizon de prédiction futur.
- Un modèle permettant de suivre l'état de charge des batteries et qui est soumis à des contraintes d'utilisation ; l'état de charge doit rester dans un intervalle de bon fonctionnement, et la puissance qu'on peut envoyer ou retirer des batteries est limitée.

Du côté bâtiment nous avons proposé :

- Un modèle d'un bâtiment monozone puis généralisé pour un bâtiment multizone, où la dynamique de la température des zones est obtenue à partir des différentes sollicitations de la température extérieure, le rayonnement solaire traversant le vitrage, l'apport des occupants et l'influence du système de chauffage que nous avons aussi modélisé.
- Un modèle de la pompe à chaleur qui assure le chauffage du bâtiment et qui représente

la charge du micro réseau.

Ensuite dans le chapitre 4, nous avons présenté la formulation de la commande prédictive et nous avons développé plusieurs contrôleurs MPC pour les appliquer sur différents systèmes :

- Un contrôleur MPC est appliqué pour la régulation thermique du bâtiment et comparé au régulateur PID. Le contrôleur MPC permet d'avoir relativement un confort meilleur et avec moins de consommation d'énergie.
- Un contrôleur MPC est appliqué pour la gestion des flux du micro-réseau et comparé à un algorithme heuristique. Le contrôleur MPC satisfait la charge (la puissance demandée) tout en ayant moins de recours au réseau électrique public et rend le micro-réseau plus autonome.
- Un contrôleur MPC par une approche distribuée a été étudié et montré qu'il est convenable aux systèmes complexes quand une approche centralisée est impossible ou n'est pas préférable.

Il convient de souligner que le contrôleur MPC semble offrir de très bonnes possibilités de commande tolérante aux défauts. Si un défaut affecte le système, il est possible de modifier les objectifs (les poids de pondération, les horizons de prédiction) ou les contraintes, ou les deux, en conséquence. Cela est également possible avec d'autres stratégies de contrôle, mais il est particulièrement clair, dans la formulation de la commande prédictive, comment les changements requis doivent être introduits dans le contrôleur. Cela est principalement dû au fait que le signal de commande est recalculé à chaque pas de temps en résolvant un problème d'optimisation, de sorte que l'on peut apporter des changements dans la formulation du problème. C'est une proposition très différente de la modification des gains ou des constantes de temps dans un contrôleur pré-calculé.

Dans le chapitre 5, nous avons passé en revue les différents types de défauts, les principales méthodes de diagnostic de défauts et de commande tolérante aux défauts. Après, les défauts qui surviennent souvent dans le système étudié notamment défaut d'un capteur, dégradation de la capacité du système de chauffage et dégradation du système de stockage ont été traités. En fin deux nouveaux filtres ont été proposés et appliqués, le premier dans le cas d'un système linéaire et le deuxième dans le cas bi-linéaire qui offre des résultats meilleurs. La continuité de service avec de bonnes performances a été assurée pour la régulation thermique du bâtiment et pour la gestion des flux de puissance du micro-réseau. En conclusion on peut dire que si l'on connaît un changement approprié en cas de défaut, il est alors facile de l'introduire et de le mettre en œuvre dans le contrôleur MPC.

La commande prédictive est une technique puissante, éprouvée industriellement, pour la régulation optimale des systèmes complexes. Les résultats présentés dans ce rapport, comme ceux fournis dans de nombreuses recherches, ont souligné les avantages de la commande prédictive. Grâce à ces améliorations en performance, l'industrie du bâtiment commence à adopter la stratégie de commande MPC.

Comme perspectives, plusieurs directions sont envisagées pour les développements futurs, en

prolongement de ces travaux de thèse :

- Étant donné que la qualité de la régulation du contrôleur MPC dépend fortement de la qualité du modèle utilisé du système, les modèles des données météorologiques doivent être améliorés pour permettre de prédire avec plus de précision les valeurs futures utilisées par le contrôleur pour calculer la séquence de commande optimale.
- Le confort des occupants a été limité à la température du bâtiment alors que d'autres facteurs tels que le taux de CO₂ et le niveau d'éclairage ont autant d'importance, ainsi une régulation de ces deux derniers facteurs s'avère nécessaire, et ceci nécessite d'améliorer le modèle du bâtiment en ajoutant d'autres éléments de commande tels que la ventilation mécanique, rideaux et volets roulants, etc.
- La charge électrique demandée par le bâtiment comprenait seulement la puissance demandée par le système de chauffage qui est certes le plus important, toutefois les autres charges telles que l'éclairage et les équipements d'usage quotidien doivent être prises en compte, pour réaliser une gestion d'énergie complète du bâtiment.
- L'algorithme de la gestion d'énergie a été développé théoriquement mais son implémentation nécessite le développement d'un modèle de l'onduleur chargeur qui est le maître du micro-grid pour aller à un niveau plus fin de commande pour la gestion des flux de puissance.
- Le problème d'optimisation développé était quadratique (Quadratique programming), cependant d'autres stratégie de commande optimale peuvent être mises en oeuvre notamment sous forme d'un problème d'optimisation de programmation linéaire avec des nombres entiers (Mixed integer linear programming), ce qui semble très intéressant dans le cas de présence de variables Tout ou Rien, ce qui est effectivement le cas de plusieurs actionneurs dans le bâtiment.
- L'approche distribuée pour le contrôle et le diagnostic de défaut apporte la solution à plusieurs problématiques liées à la complexité du système, pour cette raison le réseau de communication entre les contrôleurs mérite plus d'attention concernant ces caractéristiques.
- Enfin et à court terme, les outils de diagnostic de défauts et de commande tolérante aux défauts développés dans le dernier chapitre seront améliorés en considérant en plus les défauts du système de production (éolienne et panneaux photovoltaïques).

Bibliographie

- [Abd10] Karim Abdennadher. *Etude et Elaboration d'un système de Maintenance Prédictive Pour les condensateurs et les Batteries Utilisés dans les Alimentations sans Interruptions (ASI)*. PhD thesis, PhD thesis, Université de LYON 1, 2010.
- [Ach99] N Achaïbou. Introduction à l'étude du système de stockage dans un système photovoltaïque. *Rev. Energ. Ren : Valorisation*, pages 1–6, 1999.
- [AJS15] Abdul Afram and Farrokh Janabi-Sharifi. Gray-box modeling and validation of residential hvac system for control system design. *Applied Energy*, 137 :134–150, 2015.
- [ASC83] AN Andry, EY Shapiro, and JC Chung. Eigenstructure assignment for linear systems. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, (5) :711–729, 1983.
- [B⁺01] T. Burton et al. Wind energy handbook, John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [BD96a] Patrick Boucher and Didier Dumur. *La commande prédictive*, volume 8. Editions Technip, 1996.
- [BD96b] Patrick Boucher and Didier Dumur. *La commande prédictive*, volume 8. Editions Technip, 1996.
- [BHS06] Taha Boukhobza, Frédéric Hamelin, and Dominique Sauter. Uniform observability analysis for structured bilinear systems : A graph-theoretic approach. 2006.
- [BKL⁺06a] Mogens Blanke, Michel Kinnaert, Jan Lunze, Marcel Staroswiecki, and Jochen Schröder. *Diagnosis and fault-tolerant control*, volume 2. Springer, 2006.
- [BKL⁺06b] Mogens Blanke, Michel Kinnaert, Jan Lunze, Marcel Staroswiecki, and Jochen Schröder. *Diagnosis and fault-tolerant control*, volume 2. Springer, 2006.
- [BnGRLr92] C Bernard, B Guerrier, and M-M Rosset-Louérat. Optimal building energy management : Part i—modeling. 1992.
- [BOS17] Jerome BOSCHE. *Une contribution aux défis environnementaux par des outils de commande robotique*. PhD thesis, 2017.
- [Com91] CHAM Company. Phoenix, reference manuals. 1991.
- [CP12] Jie Chen and Ron J Patton. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*, volume 3. Springer Science & Business Media, 2012.
- [CS14] R Chargui and H Sammouda. Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using trnsys software. *Energy Conversion and Management*, 81 :384–399, 2014.
- [DBB20] John A Duffie, William A Beckman, and Nathan Blair. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. John Wiley & Sons, 2020.

- [DMO⁺12] Hanane Dagdougui, Riccardo Minciardi, Ahmed Ouammi, Michela Robba, and Roberto Sacile. Modeling and optimization of a hybrid system for the energy supply of a “green” building. *Energy Conversion and Management*, 64 :351–363, 2012.
- [Dur94] Hubert During. *Consommations énergétiques et confort thermique des locaux chauffés : approche par les modèles zonaux*. PhD thesis, Lyon, INSA, 1994.
- [Fan73] Povl Ove Fanger. Assessment of man’s thermal comfort in practice. *Occupational and Environmental Medicine*, 30(4) :313–324, 1973.
- [FD97] Paul M Frank and Xianchun Ding. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of process control*, 7(6) :403–424, 1997.
- [GA91a] Zhiqiang Gao and Panos J Antsaklis. Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems. *international Journal of Control*, 53(3) :717–729, 1991.
- [GA91b] Zhiqiang Gao and Panos J Antsaklis. Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems. *international Journal of Control*, 53(3) :717–729, 1991.
- [GA92a] Zhiqiang Gao and Panos J Antsaklis. Reconfigurable control system design via perfect model following. *International Journal of Control*, 56(4) :783–798, 1992.
- [GA92b] Zhiqiang Gao and Panos J Antsaklis. Reconfigurable control system design via perfect model following. *International Journal of Control*, 56(4) :783–798, 1992.
- [GCW⁺03] Murat Guler, Scott Clements, Linda M Wills, Bonnie S Heck, and George J Vachtsevanos. Transition management for reconfigurable hybrid control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(1) :36–49, 2003.
- [HGK09] Fatih O Hocaoglu, Ömer N Gerek, and Mehmet Kurban. A novel hybrid (wind–photovoltaic) system sizing procedure. *Solar Energy*, 83(11) :2019–2028, 2009.
- [Him78] David Mautner Himmelblau. *Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes*, volume 8. Elsevier Science Ltd, 1978.
- [HKH87] Raymond Hanus, Michel Kinnaert, and J-L Henrotte. Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method. *Automatica*, 23(6) :729–739, 1987.
- [HND98] Philip Haves, Leslie K Norford, and Mark DeSimone. A standard simulation test bed for the evaluation of control algorithms and strategies. *ASHRAE transactions*, 104 :460, 1998.
- [Hou12] Azeddine Houari. *Contribution à l’étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques*. PhD thesis, 2012.
- [HS90] Chien Y Huang and Robert F Stengel. Restructurable control using proportional-integral implicit model following. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 13(2) :303–309, 1990.
- [IB97] Rolf Isermann and Peter Balle. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control engineering practice*, 5(5) :709–719, 1997.
- [Inc98] Fluent Inc. Fluent user’s guide, version 5.3. 1998.

-
- [Ise84a] Rolf Isermann. Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey. *automatica*, 20(4) :387–404, 1984.
- [Ise84b] Rolf Isermann. Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey. *automatica*, 20(4) :387–404, 1984.
- [Ise97] Rolf Isermann. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods—an introduction. *Control engineering practice*, 5(5) :639–652, 1997.
- [JS10] Hicham Jamouli and Dominique Sauter. Adaptive estimation of loss control effectiveness based on fault detection filter. In *18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'10*, pages 82–86. IEEE, 2010.
- [JS17] Abderrahmane Jarrou and Dominique Sauter. Simulation, analysis and identification of a renewable energy system. In *2017 15th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, pages 401–404. IEEE, 2017.
- [JS20] Abderrahmane Jarrou and Dominique Sauter. Fault tolerant control of nearly zero energy buildings. In *2nd International Conference on Smart Grid and Green Energy (SGGE)*, 2020.
- [JSA19] Abderrahmane Jarrou, Dominique Sauter, and Karim Alami. Fault diagnosis and fault tolerant control based on model predictive control for nearly zero energy buildings. In *2019 4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol)*, pages 219–225. IEEE, 2019.
- [JSC⁺18] Abderrahmane Jarrou, Dominique Sauter, Brahim Chouri, Karim Alami, and Abdellah Ailane. Model predictive control (mpc) for building optimal temperature control. In *2nd International Conference on Smart Application and Data Analysis for Smart Cities, SADASC'18*, 2018.
- [KA96] I Konstantopoulos and P Antsaklis. An eigenstructure assignment approach to control reconfiguration. In *Proceedings of the 4th IEEE Mediterranean Symposium on Control et Automation, Chania, Crete, Greece*, pages 328–333, 1996.
- [KBM04] SA Klein, WA Beckman, and JW Mitchell. Trnsys—a transient simulation program. solar energy laboratory. 2004.
- [Kel99] J-Y Keller. Fault isolation filter design for linear stochastic systems. *Automatica*, 35(10) :1701–1706, 1999.
- [KK98] Nikolaos Kazantzis and Costas Kravaris. Nonlinear observer design using lyapunov’s auxiliary theorem. *Systems & Control Letters*, 34(5) :241–247, 1998.
- [KKS⁺17] Albina Khakimova, Aliya Kusatayeva, Akmaral Shamshimova, Dana Sharipova, Alberto Bemporad, Yakov Familiant, Almas Shintemirov, Viktor Ten, and Matteo Rubagotti. Optimal energy management of a small-size building via hybrid model predictive control. *Energy and Buildings*, 140 :1–8, 2017.
- [KMW⁺13] Mikkel Urban Kajgaard, Jesper Mogensen, Anders Wittendorff, Attila Todor Veress, and Benjamin Biegel. Model predictive control of domestic heat pump. In *2013 American Control Conference*. IEEE, 2013.
- [KPP15] Christodoulos Keliris, Marios M Polycarpou, and Thomas Parisini. A robust nonlinear observer-based approach for distributed fault detection of input–output interconnected systems. *Automatica*, 53 :408–415, 2015.
- [Lar] L Laret. Contribution au developpement de modeles mathematiques du comportement thermique transitoire de structures d’habitation, these, universite de liege, 1980.

- [LCLF00] Z Lin, TT Chow, JP Liu, and KF Fong. Cfd simulation of transient cooling in a typical hong kong office. In *Proc. ASHRAE/CIBSE 2000 conference, Dublin, Ireland*. Citeseer, 2000.
- [LL06] Yew-Wen Liang and Der-Cherng Liaw. Common stabilizers for linear control systems in the presence of actuators outage. *Applied mathematics and computation*, 177(2) :635–643, 2006.
- [LS97] Binfan Liu and Jennie Si. Fault isolation filter design for linear time-invariant systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(5) :704–707, 1997.
- [LSBN⁺17] Massimo La Scala, Sergio Bruno, Carlo Alberto Nucci, Sara Lamonaca, and Ugo Stecchi. *From smart grids to smart cities : new challenges in optimizing energy grids*. John Wiley & Sons, 2017.
- [LV06] Anne Labouret and Michel Viloz. *Energie solaire photovoltaïque*, volume 4. Dunod, 2006.
- [LWS15] Yuehong Lu, Shengwei Wang, and Kui Shan. Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings. *Applied Energy*, 155 :463–477, 2015.
- [Mac97] JM Maciejowski. Modelling and predictive control : Enabling technologies for reconfiguration. In *Proceedings of IFAC Symposium on System Structure and Control*, 1997.
- [Mac02] Jan Marian Maciejowski. *Predictive control : with constraints*. Pearson education, 2002.
- [MBCC08] Iulian Munteanu, Antoneta Iuliana Bratcu, Nicolaos-Antonio Cutululis, and Emil Ceanga. *Optimal control of wind energy systems : towards a global approach*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [MO90] WD Morse and KA Ossman. Model following reconfigurable flight control system for the afti/f-16. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 13(6) :969–976, 1990.
- [MWWA01] Marjorie Musy, Etienne Wurtz, Frederick Winkelmann, and Francis Allard. Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative/convective heater. *Building and Environment*, 36(5) :589–596, 2001.
- [Nou02] H Noura. Méthodes d’accommodation aux défauts : Théorie et application. *These de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1*, 1(2.5) :1, 2002.
- [NSA04] Henrik Niemann, Jakob Stoustrup, and Rune B Abrahamsen. Switching between multivariable controllers. *Optimal control applications and methods*, 25(2) :51–66, 2004.
- [NSH97] Hassan Noura, Dominique Sauter, and Frédéric Hamelin. Evaluation of a fault-tolerant control design for actuator faults. In *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, volume 4, pages 3982–3983. IEEE, 1997.
- [NSHT00] Hassan Noura, Dominique Sauter, Frederic Hamelin, and Didier Theilliol. Fault-tolerant control in dynamic systems : Application to a winding machine. *IEEE control systems magazine*, 20(1) :33–49, 2000.
- [OBDT06] Belkacem OULD BOUAMAMA and Geneviève Dauphin-Tanguy. Modélisation par bond graph : Éléments de base pour l’énergétique. *Techniques de l’ingénieur. Génie énergétique*, (BE8280), 2006.

-
- [Osm96] A Osman. Model-based control of laboratory hvac systems. *Doctor of Philosophy, University of Wisconsin*, 1996.
- [PÁGB10] Manuel Pasamontes, José Domingo Álvarez, José Luis Guzmán, and Manuel Berenguel. Bumpless switching in control—a comparative study. In *2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [PC91] Ron J Patton and Jie Chen. A review of parity space approaches to fault diagnosis. *IFAC Proceedings Volumes*, 24(6) :65–81, 1991.
- [Pet17] Vincent Petit. *Energy Transition*. Springer, 2017.
- [PIG11] Bhubaneswari Parida, S_ Iniyan, and Ranko Goic. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3) :1625–1636, 2011.
- [PK09] Ron J Patton and Supat Klinkhieo. An adaptive approach to active fault-tolerant control. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 2(1), 2009.
- [RBH⁺17] Meysam Razmara, GR Bharati, Drew Hanover, Mahdi Shahbakhti, Sumit Paudyal, and Rush D Robinett III. Building-to-grid predictive power flow control for demand response and demand flexibility programs. *Applied Energy*, 203 :128–141, 2017.
- [RCB98] Edward Ratnam, Thomas Campbell, and Roy Bradley. Advanced feedback control of indoor air quality using real-time computational fluid dynamics. *ASHRAE Transactions*, 104 :612, 1998.
- [RLM05] Jacques Richalet, Guy Lavielle, and Joëlle Mallet. *La commande prédictive : Mise en oeuvre et applications industrielles*, ´ editions eyrolles, 2005.
- [Rod05] Mickaël Rodrigues. *Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires*. PhD thesis, 2005.
- [Ros03] J Anthony Rossiter. *Model-based predictive control : a practical approach*. CRC press, 2003.
- [Rou84] JJ Roux. *Proposition de modèle simplifiés pour l’étude du comportement thermique des bâtiment*. INSA de Lyon. PhD thesis, Thèse de Doctorat, 1984.
- [Rug90] Wilson J Rugh. Analytical framework for gain scheduling. In *1990 American Control Conference*, pages 1688–1694. IEEE, 1990.
- [SFL06] Dimitra Sakellari, Martin Forsén, and P Lundqvist. Investigating control strategies for a domestic low-temperature heat pump heating system. *International journal of refrigeration*, 29(4) :547–555, 2006.
- [SG01] Marcel Staroswiecki and Anne-Lise Gehin. From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, 25 :1–11, 2001.
- [SH99] Dominique Sauter and Frederic Hamelin. Frequency-domain optimization for robust fault detection and isolation in dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(4) :878–882, 1999.
- [SJY20] Mona Subramaniam, Tushar Jain, and Joseph J Yamé. Bilinear model-based diagnosis of lock-in-place failures of variable-air-volume hvac systems of multizone buildings. *Journal of Building Engineering*, 28 :101023, 2020.
- [SKP00] Gyula Simon, Tamás Kovácsházy, and Gábor Péceli. Transients in reconfigurable control loops. In *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]*, volume 3, pages 1333–1337. IEEE, 2000.

- [SR99] Daniel J Stilwell and Wilson J Rugh. Interpolation of observer state feedback controllers for gain scheduling. *IEEE transactions on automatic control*, 44(6) :1225–1229, 1999.
- [Sta02] Marcel Staroswiecki. On reconfigurability with respect to actuator failures. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1) :257–262, 2002.
- [Sta04] Marcel Staroswiecki. Progressive accommodation of actuator faults in the linear quadratic control problem. In *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)(IEEE Cat. No. 04CH37601)*, volume 5, pages 5234–5241. IEEE, 2004.
- [Sta05] M Staroswiecki. Fault tolerant control using an admissible model matching approach. In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2421–2426. IEEE, 2005.
- [SYAH15] Dominique Sauter, Joseph Yamé, Christophe Aubrun, and Frédéric Hamelin. Design of fault isolation filter for control reconfiguration : Application to energy efficiency control in buildings. In *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 197–202. IEEE, 2015.
- [TB00] Jean Thoma and B Ould Bouamama. *Modelling and simulation in thermal and chemical engineering : A bond graph approach*. Springer Science & Business Media, 2000.
- [TCJ02] Gang Tao, Shuhao Chen, and Suresh M Joshi. An adaptive control scheme for systems with unknown actuator failures. *Automatica*, 38(6) :1027–1034, 2002.
- [THOM17] H el ene Thieblemont, Fariborz Haghghat, Ryoza Ooka, and Alain Moreau. Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system : A review of the state-of-the art. *Energy and Buildings*, 153 :485–500, 2017.
- [TJ05] Gang Tao and Suresh M Joshi. Adaptive output feedback compensation of variant actuator failures. In *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, pages 4862–4867. IEEE, 2005.
- [TNS98] Didier Theilliol, Hassan Noura, and Dominique Sauter. Fault-tolerant control method for actuator and component faults. In *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 98CH36171)*, volume 1, pages 604–609. IEEE, 1998.
- [TSP03] D Theilliol, D Sauter, and JC Ponsart. A multiple model based approach for fault tolerant control in non-linear systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(5) :149–154, 2003.
- [VKH⁺10] Michel Verhaegen, Stoyan Kanev, Redouane Hallouzi, Colin Jones, Jan Maciejowski, and Hafid Smail. Fault tolerant flight control-a survey. In *Fault tolerant flight control*, pages 47–89. Springer, 2010.
- [VLK09] Massimo Vaccarini, Sauro Longhi, and M Reza Katebi. Unconstrained networked decentralized model predictive control. *Journal of Process Control*, 19(2) :328–339, 2009.
- [VRW05] Aswin N Venkat, James B Rawlings, and Stephen J Wright. Stability and optimality of distributed model predictive control. In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 6680–6685. IEEE, 2005.

-
- [WL00] An-Ping Wang and Sheng-Fuu Lin. The parametric solutions of eigenstructure assignment for controllable and uncontrollable singular systems. *Journal of mathematical analysis and applications*, 248(2) :549–571, 2000.
- [WMHS15] Matt Wallace, Prashant Mhaskar, John House, and Timothy I Salsbury. Offset-free model predictive control of a heat pump. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(3) :994–1005, 2015.
- [WS87] JOHNE White and JASONL Speyer. Detection filter design : Spectral theory and algorithms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 32(7) :593–603, 1987.
- [Wu04] N Eva Wu. Coverage in fault-tolerant control. *Automatica*, 40(4) :537–548, 2004.
- [WX06] Shengwei Wang and Xinhua Xu. Simplified building model for transient thermal performance estimation using ga-based parameter identification. *International journal of thermal sciences*, 45(4) :419–432, 2006.
- [WZG17] Chao Wu, Chunbo Zhu, and Yunwang Ge. A new fault diagnosis and prognosis technology for high-power lithium-ion battery. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(7) :1533–1538, 2017.
- [XG89] Xiao-Hua Xia and Wei-Bin Gao. Nonlinear observer design by observer error linearization. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 27(1) :199–216, 1989.
- [Y⁺08] Joseph J Yame et al. A real-time model-free reconfiguration mechanism for fault-tolerance : Application to a hydraulic process. In *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pages 91–96. IEEE, 2008.
- [YDL15] Ying Yang, Steven X Ding, and Linlin Li. On observer-based fault detection for nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 82 :18–25, 2015.
- [YQK10] Joseph J Yamé, Hanping Qiao, and Michel Kinnaert. A self-conditioned implementation of switching controllers for smooth transition in multimode systems. In *2010 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, pages 528–533. IEEE, 2010.
- [YS96] D Yu and Derek Nicholas Shields. A bilinear fault detection observer. *Automatica*, 32(11) :1597–1602, 1996.
- [ZBS⁺17] Yi Zong, Georg Martin Böning, Rui Mirra Santos, Shi You, Junjie Hu, and Xue Han. Challenges of implementing economic model predictive control strategy for buildings interacting with smart energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 114 :1476–1486, 2017.
- [ZJ02a] YM Zhang and Jin Jiang. Active fault-tolerant control system against partial actuator failures. *IEE proceedings-Control Theory and applications*, 149(1) :95–104, 2002.
- [ZJ02b] Youmin Zhang and Jin Jiang. Design of restructurable active fault-tolerant control systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1) :101–106, 2002.
- [ZJ08] Youmin Zhang and Jin Jiang. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual reviews in control*, 32(2) :229–252, 2008.

Résumé

Ce travail de thèse a pour objectif de développer pour un système de production d'énergies renouvelables multi-sources des outils méthodologiques de diagnostic de défauts et de commande tolérante à ces mêmes défauts. Dans ce contexte on considère un système de production-stockage et consommation d'énergie intelligent, capable de réagir dynamiquement à son contexte d'usage et dont la consommation d'énergie est mesurée et contrôlée grâce à des systèmes de surveillance. A partir de ces flux d'informations, les performances énergétiques de bâtiments existants (récents et anciens) peuvent être surveillées, évaluées et contrôlées par le développement de méthodologies et d'outils s'appuyant sur des facteurs pertinents tels que le comportement de l'utilisateur, les prévisions météorologiques, l'occurrence de défauts,...

Cette thèse propose l'élaboration d'un schéma de commande optimale pour contrôler les conditions climatiques du bâtiment. L'objectif est d'assurer le confort des occupants avec le minimum d'énergie consommée. Une approche MPC (model predictive control) est proposée tout d'abord dans un contexte centralisé, puis déclinée dans une version distribuée pour des bâtiments de grandes dimensions. En présence de défauts, les performances énergétiques des bâtiments sont dégradées et il convient de mettre en œuvre une commande tolérante à ces défauts (FTC). Le schéma FTC proposé repose sur un diagnostic des instruments du bâtiment (capteur et actionneur) qui adapte les lois de commande en sorte que les performances actuelles restent proches des performances désirées. Dans la thèse ces approches sont développées dans un cadre de modélisation linéaire puis bi-linéaire. Les résultats de simulation montrent l'efficacité des méthodes proposées.

Mots clés : commande optimale, MPC, sûreté de fonctionnement, diagnostic de défauts, observateurs d'état, systèmes linéaires, systèmes bi-linéaires, génération de résidus, commande tolérante aux défauts.

Abstract

The aim of this thesis work is to develop methodological tools for fault diagnosis and fault tolerant control for a multi-source renewable energy production system. In this context we consider an intelligent energy production-storage and consumption system, capable of reacting dynamically to its context of use and whose energy consumption is measured and controlled by monitoring systems.

Based on these information flows, the energy performance of existing buildings (new and old) can be monitored, evaluated and controlled by developing methodologies and tools based on relevant factors such as user behaviour, weather forecasts, occurrence of faults, ...

This thesis proposes the development of an optimal control scheme to control the climatic conditions of the building. The objective is to ensure the comfort of the occupants with the minimum energy consumption. A MPC (model predictive control) approach is first proposed in a centralized context, then declined in a distributed version for large buildings. In the presence of faults, the energy performance of buildings is degraded and a fault-tolerant control (FTC) should be implemented. The proposed FTC scheme is based on a diagnosis of the building instruments (sensor and actuator) that adapts the control laws so that the current performance remains close to the desired performance. In the thesis these approaches are developed in a linear and then bi-linear modeling framework. Simulation results show the efficiency of the proposed methods.

Keywords : optimal control, MPC, dependability, fault diagnosis, state observers, linear systems, bi-linear systems, residuals generation, fault tolerant control.

