



**HAL**  
open science

# Méthode pour la détection de défauts des systèmes énergétiques : couplage expertise et méthode de réduction de dimensions

Hugo Geoffroy

► **To cite this version:**

Hugo Geoffroy. Méthode pour la détection de défauts des systèmes énergétiques : couplage expertise et méthode de réduction de dimensions. Génie civil. Université Savoie Mont Blanc, 2020. Français. NNT : 2020CHAMA051 . tel-03483106

**HAL Id: tel-03483106**

**<https://theses.hal.science/tel-03483106v1>**

Submitted on 16 Dec 2021

**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.



UNIVERSITÉ  
SAVOIE  
MONT BLANC

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Sciences pour l'Ingénieur**

Arrêtée ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Hugo GEOFFROY**

Thèse dirigée par **M. Gérard SAUCE**  
et codirigée par **Mme. Evelyne GONZE**

préparée au sein du **Laboratoire LOCIE**  
dans **l'École Doctorale SISEO**

## "Méthode pour la détection de défauts des systèmes énergétiques"

"Couplage expertise et méthode de réduction de  
dimensions"

Thèse soutenue publiquement le **15/12/2020**,  
devant le jury composé de :

**Mme. Valérie Roy**

Directeur de recherche aux Mines Paritech, Présidente

**M. John R. Littlewood**

Professeur à la Cardiff School of Art & Design, Rapporteur

**M. Erwin Franquet**

Professeur à l'Université Côte d'Azur, Rapporteur

**Mme. Gaël HUERRE**

Ingénieur de recherche à Engie Cofely, Examinatrice

**Mme. Evelyne GONZE**

Professeur, Université Savoie Mont-Blanc, Directrice de thèse

**M. Gérard SAUCE**

Maître de Conférence HDR, Université Savoie Mont-Blanc, Co-Directeur de thèse

**M. Julien BERGER**

Chargé de Recherche CNRS, Université La Rochelle, Co-Encadrant de thèse





---

*"A la Lionne de la famille!"*

---



## Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier l'Université Savoie Mont Blanc et le Laboratoire du LOCIE de m'avoir permis de réaliser ces travaux durant ces trois années.

Je remercie le projet Interreg CREnHOM qui a financé ces travaux de thèse.

Je remercie Gérard Sauce et Catherine Buhe qui ont supervisé ces travaux et m'ont offert la chance de réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de mon jury qui ont accepté d'examiner mes travaux. Merci à Monsieur John Littlewood et Monsieur Erwin Franquet d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit, ainsi que Madame Valérie Roy et Madame Gaël Huerre d'avoir examiné ces travaux.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Julien Berger, pour son encadrement quotidien et son soutien indéfectible.

J'adresse toute ma gratitude à Madame Eveyne Gonze pour ses conseils avisés tant sur le plan expérimental, qu'humain, mais également car elle m'a permis de découvrir le monde de la recherche.

Je remercie également Gaëlle Guyot, pour m'avoir permis d'introduire le LOCIE en me laissant l'accompagner sur ces travaux de recherche.

Je souhaite également remercier Messieurs Denys Dutykh, Sylvain Lespinats et Benoit Colange, pour leur aide précieuse et pointue sur la partie réduction de dimension de ces travaux.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Jean-Patrick Plassiard pour son soutien et ses conseils avisés lors de réunions formelles comme informelles.

Je tiens à remercier Pierre Bouland pour son aide régulière, réactive et précieuse sur les parties administratives.

Je remercie Alexandra Roumégous de m'avoir accompagné, soutenu à Chambéry durant cette étape, mais également pour m'avoir supporté, corrigé et nourri.

Je remercie mes parents qui m'ont soutenu, motivé et également corrigé.

Pour finir je tiens également à remercier mes proches qui m'ont soutenu dans cette épreuve de trois ans, de quelque manière que ce soit.



# Table des matières

Remerciements . . . . .	i
Table des matières . . . . .	iii
<b>1 Introduction générale et état de l'art</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	2
1.1.1 Les engagements . . . . .	2
1.1.2 Les principales mesures . . . . .	2
1.1.2.1 La Réglementation . . . . .	3
1.1.2.2 Les Labels . . . . .	4
1.1.2.3 Les Contrats de Performance Énergétique . . . . .	4
1.1.3 Objectif de la thèse . . . . .	13
1.2 État de l'art des méthodes de commissionnement et de FDD . . . . .	14
1.2.1 Le Commissioning . . . . .	14
1.2.1.1 Introduction . . . . .	14
1.2.1.2 Les différentes formes de Commissioning . . . . .	15
1.2.2 La Détection de défauts et le diagnostic . . . . .	20
1.2.2.1 Introduction . . . . .	20
1.2.2.2 Les approches . . . . .	20
1.3 Problématique . . . . .	26
<b>2 Vers un référentiel expérimental pour la comparaison des défauts</b>	<b>30</b>
2.1 Introduction . . . . .	31
2.2 Définition des défauts . . . . .	31
2.2.1 Les défauts habituellement étudiés . . . . .	31
2.2.2 L'émergence de nouveaux type de défauts . . . . .	31
2.2.3 La mise en évidence des défauts . . . . .	32
2.3 La mise en place d'un référentiel de comparaison . . . . .	33
2.3.1 La nécessité d'un référentiel . . . . .	33
2.3.2 La Méthodologie de comparaison des outils de FDD . . . . .	34
2.3.3 Les données d'entrée . . . . .	35
2.3.4 Le cahier des charges du référentiel . . . . .	37
2.4 Élaboration d'un référentiel . . . . .	38
2.4.1 Le cadre . . . . .	38
2.4.2 Matériel et Méthode . . . . .	39
2.4.2.1 Présentation générale . . . . .	39
2.4.2.2 Détail des équipements techniques . . . . .	40
2.4.2.3 Protocole de suivi . . . . .	41
2.4.2.4 Propagation d'incertitude . . . . .	43
2.4.2.5 Génération des jeux de données pour fonctionnement nominal et défectueux . . . . .	44
2.5 Les résultats . . . . .	50
2.5.1 Les défauts globaux . . . . .	50

2.5.1.1	Panne de ventilateur . . . . .	50
2.5.1.2	Obstruction des gaines . . . . .	52
2.5.1.3	Rupture de courroie . . . . .	52
2.5.1.4	Encrassement des filtres . . . . .	53
2.5.2	Les données d'été . . . . .	57
2.5.2.1	Fonctionnement nominal . . . . .	57
2.5.2.2	Fonctionnement nominal du Bypass . . . . .	58
2.5.2.3	Défaut du Bypass . . . . .	59
2.5.2.4	Échec de l'activation du bypass . . . . .	61
2.5.3	Les données d'hiver . . . . .	61
2.5.3.1	Fonctionnement nominal . . . . .	62
2.5.3.2	Défaut de régulation de la batterie antigel . . . . .	63
2.5.3.3	Panne batterie antigel . . . . .	64
2.5.3.4	Panne batterie appoint . . . . .	66
2.6	Discussions . . . . .	67
2.7	Conclusion . . . . .	69
2.7.1	Synthèse du travail effectué . . . . .	69
2.7.2	Utilité de ces données . . . . .	71
2.7.3	Vers une ébauche de référentiel . . . . .	71
2.7.3.1	La génération . . . . .	71
2.7.3.2	L'analyse du <i>ground truth</i> et des défauts . . . . .	72
2.7.3.3	Organisation du référentiel . . . . .	72
<b>3</b>	<b>Un outil de détection de défaut basé sur une méthode hybride</b>	<b>74</b>
3.1	Introduction . . . . .	75
3.2	Les méthodes de réduction de dimension . . . . .	75
3.2.1	Le principe . . . . .	75
3.2.2	Les points particuliers . . . . .	77
3.2.3	Les méthodes . . . . .	79
3.2.3.1	Méthodes linéaires . . . . .	79
3.2.3.2	Méthodes non linéaires . . . . .	81
3.2.4	Comparaison des approches pour la FDD . . . . .	82
3.3	L'outil de détection de défaut et de diagnostic . . . . .	83
3.3.1	Principe et spécifications . . . . .	83
3.3.1.1	Les différentes données d'entrée . . . . .	85
3.3.2	La procédure de l'outil . . . . .	86
3.3.3	Les avantages et limites de cet outil . . . . .	87
3.4	La méthodologie détaillée . . . . .	89
3.4.1	L'étape de <i>Pré-traitement</i> . . . . .	89
3.4.1.1	Les entrées . . . . .	89
3.4.1.2	L'élaboration des règles . . . . .	90
3.4.2	L'étape de Création des cartes . . . . .	92
3.4.2.1	La sélection du nombre de points . . . . .	93
3.4.2.2	La Réduction de dimension - ASKI . . . . .	93
3.4.2.3	Le déploiement de la carte . . . . .	94
3.4.3	Phase en temps réel . . . . .	96
3.4.3.1	Traitement en temps réel . . . . .	96
3.4.3.2	Projection en temps réel . . . . .	96
3.5	Utilisation pratique de la méthode . . . . .	97
3.5.1	Sur bâtiment neuf . . . . .	97
3.5.2	Sur bâtiment existant . . . . .	99

3.6	Les données d'entrée de l'outil . . . . .	100
3.6.1	Les différents cas . . . . .	100
3.6.2	Les besoins en termes de données . . . . .	102
3.6.3	Les possibilités en terme de modélisation des défauts . . . . .	103
3.7	Conclusion . . . . .	104
<b>4</b>	<b>Évaluation de la méthode de FDD sur un cas de commissioning initial</b>	<b>106</b>
4.1	Introduction . . . . .	107
4.2	Génération des données numériques . . . . .	107
4.2.1	L'environnement . . . . .	108
4.2.1.1	Le bâtiment . . . . .	108
4.2.1.2	Les systèmes . . . . .	109
4.2.2	Synthèse des défauts générés . . . . .	111
4.3	Exécution de la méthode de FDD . . . . .	111
4.3.1	La phase de pré-traitement . . . . .	112
4.3.1.1	Pré-traitement de la saison d'hiver . . . . .	113
4.3.1.2	Pré-traitement de la saison d'été . . . . .	116
4.3.2	Génération des cartes . . . . .	119
4.3.2.1	Les cartes hivernales . . . . .	119
4.3.2.2	Les cartes estivales . . . . .	122
4.3.3	Finalisation des cartes pour une utilisation par les équipes techniques . . . . .	125
4.3.3.1	La carte pour la saison d'hiver . . . . .	125
4.3.3.2	La carte pour la saison d'été . . . . .	126
4.4	Validation expérimentale par projection des données . . . . .	127
4.4.1	Les résultats expérimentaux . . . . .	127
4.4.1.1	Les défauts globaux . . . . .	127
4.4.1.2	Les défauts hivernaux . . . . .	129
4.4.1.3	Les défauts estivaux . . . . .	129
4.4.2	Projection des résultats . . . . .	130
4.4.2.1	Les défauts globaux . . . . .	130
4.4.2.2	Les défauts hivernaux . . . . .	133
4.4.2.3	Les défauts estivaux . . . . .	134
4.5	Conclusion . . . . .	135
<b>5</b>	<b>Évaluation de la méthode de FDD sur un cas de commissioning continu</b>	<b>139</b>
5.1	Introduction . . . . .	140
5.2	Le contexte . . . . .	140
5.2.1	L'objectif . . . . .	141
5.2.2	La problématique . . . . .	142
5.3	Le cas réel de bâtiment . . . . .	143
5.3.1	L'environnement . . . . .	143
5.3.1.1	Le bâtiment . . . . .	143
5.3.1.2	Les systèmes . . . . .	143
5.3.1.3	Les données . . . . .	145
5.3.2	Les défauts . . . . .	145
5.3.2.1	Les hypothèses . . . . .	145
5.3.2.2	Le sujet d'étude . . . . .	146
5.3.2.3	Les défauts . . . . .	146
5.3.2.4	Les défauts d'hiver . . . . .	147
5.3.2.5	Les défauts d'été . . . . .	147
5.4	Les Résultats . . . . .	147

5.4.1	La phase de pré-traitement . . . . .	147
5.4.1.1	Pré-traitement de la saison d'hiver . . . . .	148
5.4.1.2	Pré-traitement de la saison d'été . . . . .	150
5.4.2	L'analyse des résultats . . . . .	150
5.4.2.1	Les cartes hivernales . . . . .	151
5.4.2.2	Les cartes estivales . . . . .	155
5.4.3	Cartes finales à destination des équipes techniques . . . . .	157
5.4.3.1	La carte pour la saison d'hiver . . . . .	157
5.4.3.2	La carte pour la saison d'été . . . . .	157
5.5	La validation . . . . .	160
5.5.1	Les donnée . . . . .	160
5.5.2	Projections . . . . .	160
5.5.2.1	La saison hivernale . . . . .	161
5.5.2.2	La saison estivale . . . . .	167
5.6	Remarques complémentaires et conclusion . . . . .	171
<b>6</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>175</b>
6.1	Synthèse . . . . .	176
6.2	Perspective . . . . .	179
	<b>Bibliographie</b>	<b>I</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>XII</b>
	<b>Liste des tableaux</b>	<b>XVII</b>
	<b>Abréviation</b>	<b>XIX</b>
<b>A</b>	<b>Annexe 1 : Protocole d'encrassement des filtres par génération de particules</b>	<b>XXII</b>
A.1	Objectif . . . . .	XXIII
A.2	Matériels et méthodes . . . . .	XXIII
A.3	Résultats . . . . .	XXIV
<b>B</b>	<b>Annexe 2 : Exemple d'organisation de la base de données</b>	<b>XXVI</b>
B.1	Organisation de la base de données . . . . .	XXVII
B.1.1	L'organisation des dossiers - L'arborescence . . . . .	XXVII
B.1.2	L'organisation des fichiers . . . . .	XXVII
B.1.3	L'organisation des données . . . . .	XXVIII
<b>C</b>	<b>Annexe 3 : Travail d'analyse de la littérature sur la modélisation des défauts</b>	<b>XXXI</b>
C.1	Les logiciels . . . . .	XXXII
C.2	EnergyPlus . . . . .	XXXIV
C.2.1	Les type de contrôles . . . . .	XXXIV
C.2.2	La modélisation des défauts . . . . .	XXXVI
C.2.2.1	La modification des paramètres d'entrée. . . . .	XXXVI
C.2.2.2	La création de modèles. . . . .	XXXVI
C.2.2.3	Les modèles natifs. . . . .	XXXVII

<b>D</b>	<b>Annexe 4 : Modélisation des défauts</b>	<b>XXXVIII</b>
D.1	Les défauts	XXXIX
D.1.1	Les défauts globaux	XXXIX
D.1.1.1	Défaut du ventilateur d'extraction.	XXXIX
D.1.1.2	Défaut du ventilateur de soufflage.	XXXIX
D.1.1.3	Panne totale des équipements.	XXXIX
D.1.1.4	Défaut des ventilateurs.	XL
D.1.1.5	Défaut d'encrassement du filtre.	XL
D.1.2	Les défauts d'hiver	XL
D.1.2.1	Défaut de la batterie antigel.	XL
D.1.2.2	Défaut de la batterie d'appoint.	XLI
D.1.2.3	Problème de régulation de la batterie antigel.	XLI
D.1.2.4	Problème de régulation de la batterie d'appoint.	XLI
D.1.3	Les défauts d'été	XLII
D.1.3.1	Défaut bypass n°1.	XLII
D.1.3.2	Défaut bypass n°2.	XLII
D.1.3.3	Défaut bypass n°3.	XLII
D.2	Les résultats	XLII
D.2.1	Les défauts globaux	XLIII
D.2.1.1	Défaut ventilateur de soufflage.	XLIII
D.2.1.2	Défaut ventilateur d'extraction.	XLIII
D.2.1.3	Panne totale des équipements.	XLIV
D.2.1.4	Défaut des ventilateurs.	XLIV
D.2.1.5	Défaut d'encrassement du filtre.	XLIV
D.2.1.6	Défaut de rupture de courroie.	XLV
D.2.2	Les défauts d'hiver	XLVI
D.2.2.1	Défaut de la batterie antigel.	XLVI
D.2.2.2	Défaut de la batterie d'appoint.	XLVII
D.2.2.3	Problème de régulation de la batterie antigel.	XLVIII
D.2.2.4	Problème de régulation de la batterie d'appoint.	XLVIII
D.2.2.5	Défaut de la batterie antigel.	XLVIII
D.2.3	Les défauts d'été	XLIX
D.2.3.1	Défaut bypass n°1.	XLIX
D.2.3.2	Défaut bypass n°2.	L
D.2.3.3	Défaut bypass n°3.	LI



# 1

## Introduction générale et état de l'art

---

---

---

<b>1.1</b>	<b>Contexte</b>	<b>2</b>
1.1.1	Les engagements	2
1.1.2	Les principales mesures	2
1.1.3	Objectif de la thèse	13
<b>1.2</b>	<b>État de l'art des méthodes de commissionnement et de FDD</b>	<b>14</b>
1.2.1	Le Commissioning	14
1.2.2	La Détection de défauts et le diagnostic	20
<b>1.3</b>	<b>Problématique</b>	<b>26</b>

---

## 1.1 Contexte

### 1.1.1 Les engagements

La prise de conscience internationale concernant les changements climatiques s'est concrétisée en 1997 avec la ratification du Protocole de Kyoto. L'engagement des pays signataires concerne la réduction de l'émission des gaz à effet de serre (GES) pour les stabiliser à un niveau n'induisant pas de perturbation anthropique dangereuse du système climatique. En 2012, ces objectifs sont révisés par le Protocole de Kyoto 2, imposant aux pays signataires de diminuer de 18% leurs consommations d'énergie par rapport à 1990 (et de 20% pour l'Union Européenne) avant 2020. Ces ambitions ont été validées lors de la COP21 dont les principaux objectifs fixés sont de contenir d'ici à 2020 le réchauffement climatique sous la limite des 2°C, le désinvestissement des énergies fossiles et l'atteinte de la neutralité carbone.

Au niveau Européen, les objectifs de sobriété ont été matérialisés par la mise en place de différentes stratégies sur le plan énergétique comme avec le *paquet climat-énergie* fixant des objectifs pour l'Europe en matière d'énergie propre, de réduction de GES et d'amélioration de l'efficacité énergétique. Le plan climat comporte des objectifs distincts atteignables et à des échéances différentes, comme avec *The 2020 Energy strategy* (e.g. 3x20 à l'horizon 2020 pour la Directive Européenne de décembre 2008) [52] ou *The 2030 Energy Strategy* [54]. Ces actions s'inscrivent dans le cadre d'une ambition à long terme visant à rendre l'économie européenne plus respectueuse du climat et moins énergivore à travers des moyens rentables, regroupés dans l'Objectif 2050 pour une économie sobre en carbone [55].

Le secteur du bâtiment étant l'un des plus gros postes de consommation d'énergie primaire, l'Europe a donc développé l'EPBD (Directive sur la performance énergétique des bâtiments) en 2002 [49]. Cette directive a permis à travers la définition d'exigences minimales pour l'ensemble des États membres des avancées significatives dans le secteur de la performance énergétique. En 2010, cette directive est remise à jour à travers l'*EPBD recast* [50] avec principalement la mise en place d'une réglementation permettant d'atteindre les *Near zero energy building* (NZEB) pour les bâtiments neufs d'ici 2020. Les retombées attendues de ces nouvelles directives sont la création de centaines de milliers d'emplois en Europe (entre deux-cents quatre-vingts et quatre-cents cinquante mille) [53, 56], au moins cinq pour cent d'économie sur la consommation globale européenne d'énergie, et cinq pour cent de réduction des GES.

En France, de nombreuses mesures sont prises au niveau national afin d'atteindre les différents objectifs fixés sur le plan mondial ou européen. Les *lois Grenelle* [77, 91, 92] sont deux lois issues du Grenelle Environnement qui cadrent au niveau français, les ambitions d'indépendance énergétique et de réduction de l'impact environnemental défini dans le plan climat européen. Aujourd'hui, la performance énergétique des bâtiments est toujours un enjeu majeur, comme le montre l'évolution des ambitions d'objectif concernant les consommations énergétiques, encadrées par les différentes réglementations thermiques (e.g. RT2012, RE2020...).

### 1.1.2 Les principales mesures

Dans le cadre de ces ambitions de réduction d'émission de GES, des consommations d'énergie et de l'amélioration de la performance énergétique, une attention particulière a été portée à la recherche du poids des différents secteurs responsables en France. Il en ressort que le secteur le plus gros consommateur d'énergie est le bâtiment avec plus de 40% de la consommation d'énergie finale, en France comme en Europe [125]. C'est pourquoi plusieurs moyens ont été mis en œuvre afin de réduire les consommations énergétiques du secteur du bâtiment. En France ils s'appuient

sur des politiques et des stratégies différentes pour atteindre ces objectifs, allant de l'imposition à l'incitation.

### 1.1.2.1 La Réglementation

Afin d'arriver à concrétiser les objectifs que la France s'est fixée en matière d'économie énergie, elle utilise un outil à sa disposition depuis 1974 : la réglementation thermique. En effet ce moyen législatif et coercitif mis en place en France est antérieur aux engagements du protocole de Kyoto. Il est issu d'une logique *top-down* ou descendante, c'est-à-dire imposée par les pouvoirs publics aux utilisateurs (propriétaires).

Les réglementations Thermiques françaises (RT) ont successivement pris en compte plusieurs facteurs impactant les consommations afin de réduire d'abord les besoins puis les consommations des bâtiments (allant de la prise en compte de l'isolation aux rendements des équipements et la conception bioclimatique).

Aujourd'hui deux RT sont en vigueur en France, la réglementation thermique existant (2007) s'appliquant aux travaux de rénovation et la RT 2012 pour les constructions neuves résidentielles et tertiaires. La RT existant est décomposée en deux mesures différentes, la *RT globale* et la *RT existant par éléments*, reposant toute les deux sur plusieurs articles du Code de la construction (L. 111-10 et R.131-25 à R.131-28-11) et de l'habitation et sur leurs arrêtés d'applications [89, 90]. L'application de la mesure se fait en fonction de l'ampleur des travaux, de l'année de construction du bâtiment et de sa surface. La représentation du cheminement servant à déterminer la RT existant à appliquer à un projet est présenté en Figure 1.1. La RT globale impose un calcul réglementaire comme les réglementations thermiques pour le neuf et est donc plus contraignante que la RT existant par élément imposant seulement l'amélioration des performances des éléments touchés par les travaux de rénovation.

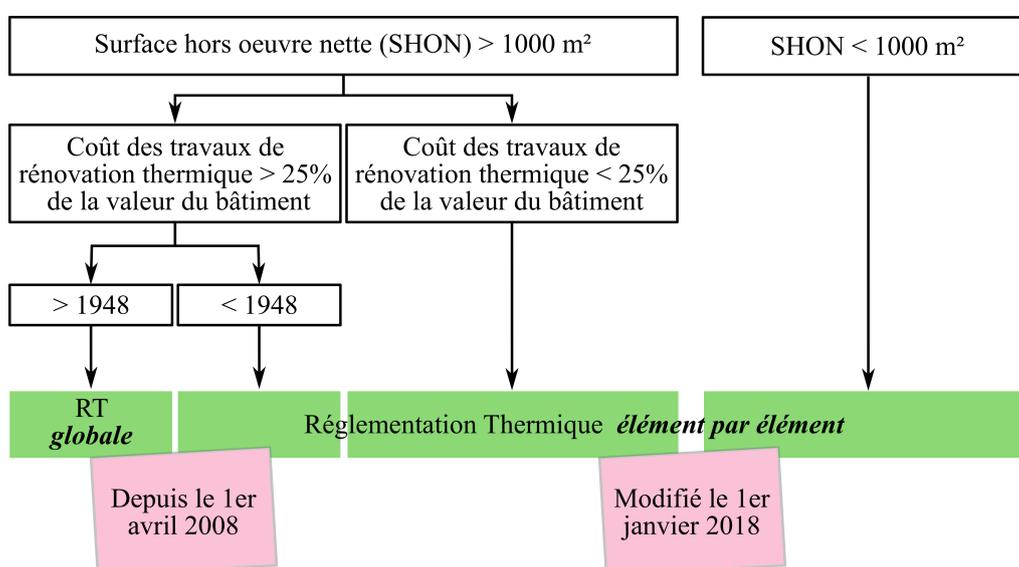


Figure 1.1 – Application de la RT existant.

La réglementation thermique actuelle, RT 2012, est entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2013 et s'applique à la quasi-totalité des projets de constructions résidentielles et tertiaires neuves. Elle impose le respect d'une qualité de l'approche bioclimatique énoncée dans la RT 2005 à travers le coefficient sur les besoins bioclimatiques « Bbio ».

La RE2020 devrait faire son entrée prochainement dans le cadre réglementaire français. La RE

pour réglementation environnementale ambitieuse de surpasser la RT2012 en matière de performance énergétique des bâtiments, mais intègre également l'impact carbone de ces derniers. Ainsi les bâtiments neufs seront classés selon un référentiel énergétique en quatre niveaux, allant de RT2012 avec une réduction de 5% à 15% des consommations à bâtiment à énergie positive (Bepos) et selon deux niveaux de performance environnementale. Les niveaux de performance environnementale sont basés sur l'analyse de cycle de vie du bâtiment (sur 50 ans), prenant en compte sa construction comme son exploitation et sa démolition. Depuis 2016, l'expérimentation *E+C-* pour énergie positive et réduction carbone, est mise en place en France avec des maîtres d'ouvrage (MOA) volontaires, afin d'expérimenter les seuils à mettre en place pour la RE2020.

Pour résumer la France met en place un arsenal réglementaire en constante évolution, permettant d'atteindre les objectifs fixés dans le cadre Européen. Elle est aujourd'hui le pays d'Europe le plus en avance en matière d'ambition de réduction des consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment, ainsi que dans ses ambitions de mise en œuvre calendaire.

### 1.1.2.2 Les Labels

En opposition à la logique *top-down* s'est développée en France comme dans le monde, une autre forme de promotion de l'efficacité énergétique des bâtiments qui se trouve être la création et l'obtention de Label. Ce mode de promotion de l'amélioration de la performance des bâtiments est considéré comme issu d'une logique *bottom-up*, car son obtention passe par une volonté du MOA et bien qu'il puisse être promu par les pouvoirs publics, il n'est pas obligatoire.

Parmi les différents labels ayant fait leur apparition, il peut être dégagé deux grandes catégories, les labels certifiant de la *qualité de l'efficacité énergétique* des bâtiments et les labels certifiant de la *qualité environnementale* des bâtiments.

Parmi les labels concernant uniquement la performance des bâtiments, on compte par exemple le label international *Passiv'Haus*, ou encore le label *Minergie*. Ces certifications sont contraignantes sur les matériaux de construction, les systèmes et parfois sur les énergies renouvelables afin de réduire au maximum les consommations.

Les labels environnementaux vont plus loin que les labels d'efficacité énergétique et reposent sur la notion de *développement durable* définie lors du rapport de Brundtland en 1987 [24]. Ces certifications prennent en compte d'autres concepts que seulement l'énergie comme par exemple la gestion de l'eau et des déchets, la santé, ou encore l'impact écologique des matériaux... Parmi les principaux labels environnementaux on peut citer la certification anglaise BREEAM, ou l'américaine LEED.

### 1.1.2.3 Les Contrats de Performance Énergétique

Le contrat de performance énergétique (CPE) est un partenariat entre un propriétaire et une société de services énergétiques (ESCO pour *Energy Service Company*) afin d'effectuer des améliorations énergétiques significatives sur un bâtiment, se traduisant par des économies d'énergie visibles (donc financières). Cette méthode est aujourd'hui développée un peu partout dans le monde (USA, Chine, Russie). Elle est considérée comme efficace et très rentable pour réaliser des économies d'énergie [163].

#### *Les objectifs*

Le premier CPE créé en France a été mis en place en 2009 [58], néanmoins le CPE n'étant pas contrat nommé, il ne possède donc pas à ce jour de cadre réglementaire. Il est cependant défini au niveau Européen via la Directive 2012/27/UE du 25 octobre 2012 [51], afin de fixer un cadre européen pour la promotion de l'efficacité énergétique et d'assurer l'atteinte des objectifs fixés dans

« The 2020 Energy strategy » ainsi que ceux fixés pour les échéances à plus long terme [52]. Ainsi le CPE est défini comme étant un « Un accord contractuel entre le bénéficiaire et le fournisseur d'une mesure visant à améliorer l'efficacité énergétique, vérifiée et surveillée pendant toute la durée du contrat, aux termes duquel les investissements (travaux, fournitures ou services) dans cette mesure sont rémunérés en fonction d'un niveau d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est contractuellement définie ou d'un autre critère de performance énergétique convenu, tel que des économies financières ». Ainsi cette définition différencie le CPE des autres services énergétiques par l'introduction de deux nouveaux critères, l'engagement de la responsabilité d'un prestataire dans les investissements d'efficacité énergétique pour réduire les consommations et une garantie de l'amélioration de cette efficacité après la mise en place des mesures de la part du prestataire, se traduisant par une réduction des consommations d'énergie durant la période contractualisée [29]. La mise en place d'un CPE est une procédure pouvant être décomposée en plusieurs étapes clés qui sont la budgétisation, l'audit énergétique, l'appel d'offre, l'évaluation des propositions, le choix du financement et l'élaboration du contrat [156]. Après la mise en place du CPE deux autres étapes viennent logiquement se greffer à ce processus qui sont la mise en place des mesures d'économie d'énergie (MCE) et la mise en place du plan de mesure et vérification (PMV).

La mise en place de contrats de performances énergétiques peut être effectuée sous différentes conditions et le CPE prendra alors des dénominations différentes afin de les différencier.

Avant de développer le sujet du CPE il est important de rappeler le cadre de ce que l'on appelle la GPE pour *garantie de performance énergétique contractuelle*. L'objectif principal de la GPE est l'atteinte des ambitions de réduction des consommations d'énergie au niveau du cadre Européen (*e.g.* facteur 4), cette fois en engageant une responsabilité sur des consommations maximales via une méthodologie fiable conduite en partie par l'ADEME et la Fondation Bâtiment-Énergie. La GPE se définit alors comme étant une garantie de performance énergétique mise en œuvre par une obligation des objectifs d'efficacité énergétique préalablement fixés, souscrite par un prestataire [26]. Il existe alors deux types de GPE qui sont la garantie de performance énergétique intrinsèque (GPEI) et la garantie de résultats énergétiques (GRE). Elles sont présentées dans la Figure 1.2.

La GPEI (*i*) intervient dans le cadre de bâtiments neufs ou subissant des travaux et se situe aux stades de conception et des travaux. Elle a pour objectif de garantir des consommations maximales calculées sur les cinq postes réglementaires de la RT (chauffage, ECS, refroidissement, éclairage et auxiliaire). Ces consommations s'écartent des consommations réglementaires car les hypothèses de calcul diffèrent afin d'être représentatifs des besoins de M.OA. (*e.g.* sur les scénarios d'occupation ou météorologique). Cette garantie court jusqu'à un an après la réception, et peut être étendue à deux dans le cas des gros projets [77]. Il conviendrait d'étendre cette garantie à deux ans, car la première année de chauffe est utilisée pour le réglage et la mise au point des systèmes et donc le bâtiment n'est pas encore dans des conditions stables de fonctionnement.

La GRE (*ii*) va plus loin que la GPEI, en assurant une consommation énergétique maximale effective (*i.e.* réelle). Son application couvre donc également l'exploitation la maintenance et l'usage du bâtiment, et possède un périmètre d'usage libre (ne s'applique pas forcément sur les postes conventionnels de la RT). Sa mise en place peut être établie sur des durées variables et sous-entend l'élaboration de plans de mesure pour comparer les prédictions aux consommations effectives. En cas de non-respect de la garantie des pénalités peuvent être appliquées à ESCO et durant les périodes de respect un partage des économies est envisageable [77].

Le CPE correspond donc à la mise en pratique d'une GPE en contractualisant les consommations prévisionnelles sur la base des hypothèses fixées dans le calcul et en engageant la responsabilité des parties prenantes sur le respect de ces dernières.

### *Les formes de CPE*

Le CPE est un contrat de droit commun ayant un cadre très souple, c'est-à-dire que son contenu peut être défini et son périmètre d'action facilement adapté aux besoins des parties. Il existe quatre

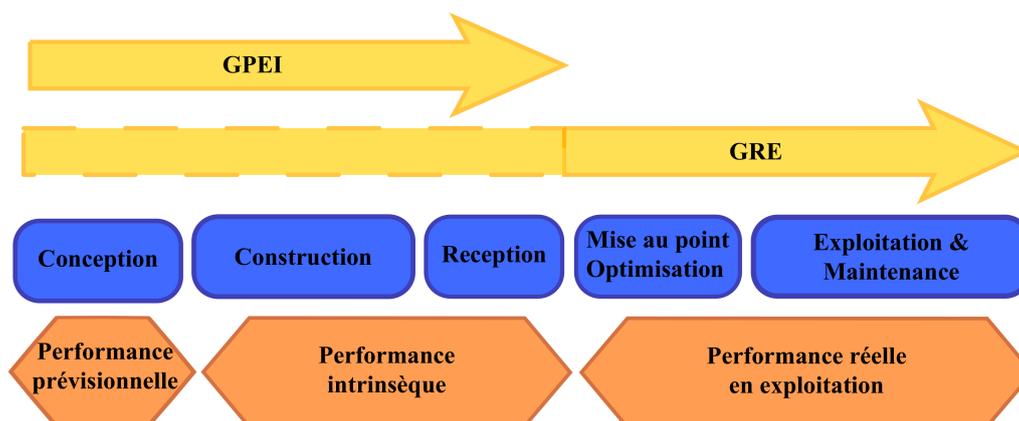


Figure 1.2 – Exemple des Garanties de Performance Énergétiques.

types de CPE en fonction des actions proposées par les ESCO, (i) le CPE services, (ii) le CPE fournitures et services, (iii) le CPE travaux et services et pour finir (iv) le CPE global.

Le CPE services (i) s'applique uniquement sur les systèmes, leur maintenance, la régulation, la GTB et la fourniture d'énergie. Le CPE de service induit qu'aucuns travaux (lourds) ne sera réalisé, mais que la mise en place d'instrumentation peut être effectuée. Ce type de CPE permet de réduire les consommations d'énergie à faible coût, néanmoins les économies attendues sont inférieures à 20 % [21] et il n'induit pas de réelles plus-values du patrimoine.

Dans le CPE fournitures et services (ii) les ESCO fournissent le ou les équipements (et éventuellement la mise en place de régulation et d'une GTB) et en assurent l'exploitation et la maintenance durant la durée du contrat. Il s'effectue dans les cas où les systèmes sont très consommateurs et permet donc de moderniser les équipements tout en réduisant les consommations d'énergie. Ce type de CPE est souvent autofinancé par les économies d'énergie réalisées.

Le CPE travaux et services (iii) se met en place lors d'interventions sur le bâti (*i.e.* isolation de l'enveloppe, menuiserie ou étanchéité) et la société effectuant les travaux assurera également la maintenance et l'exploitation du bâtiment durant la période du contrat. Cette forme de CPE permet d'effectuer des économies d'énergie conséquentes et d'améliorer la valeur du patrimoine en contrepartie d'investissements beaucoup plus lourds et de retours sur investissement plus longs.

Le CPE global (iv) regroupe en fait tous les autres modèles et comprend des travaux, de la fourniture d'équipements et des prestations de service. Cette forme de CPE permet donc moyennant les études adéquates une optimisation du bâtiment induisant des économies les plus importantes, et permettant de rénover complètement ce dernier. Ce modèle est très attractif du point de vue des économies d'énergie (et donc financières associées) et améliore considérablement la valeur du patrimoine, mais nécessite une mobilisation de capital importante. L'investissement étant conséquent les retours sur investissement le sont également. Il est compliqué de rembourser les investissements seulement avec les économies engendrées, mais la plus-value sur la valeur du bien immobilier peut être intégrée dans le calcul du retour sur investissement.

### *Les formes de rémunération*

Il existe dans la pratique deux mises en place différentes de CPE induisant des différences dans le financement des MCE, la répartition des prises de risque ainsi que dans celle des économies réalisées [12, 13].

La première forme correspond à la garantie de performance énergétique, son principe est illustré en Figure 1.3. Dans ce modèle l'investissement pour les MCE du projet est effectué sur les fonds propres du propriétaire du bâtiment (ou via un tiers investisseur de type établissement bancaire) et il bénéficie de l'intégralité des économies financières issues de la diminution des

consommations énergétiques. Les ESCO effectuent la conception et l'implémentation des MCE, s'assurent de leur bon fonctionnement (ils garantissent qu'elles couvrent le remboursement des investissements), peuvent aider le propriétaire à trouver des financements et se font rémunérer pour cela. En contrepartie si les économies ne permettent pas les remboursements les ESCO doivent couvrir les pertes financières. Dans ce modèle l'intégralité des risques liés aux améliorations de la performance est pris en charge par les ESCO en contrepartie d'aucun investissement économique.

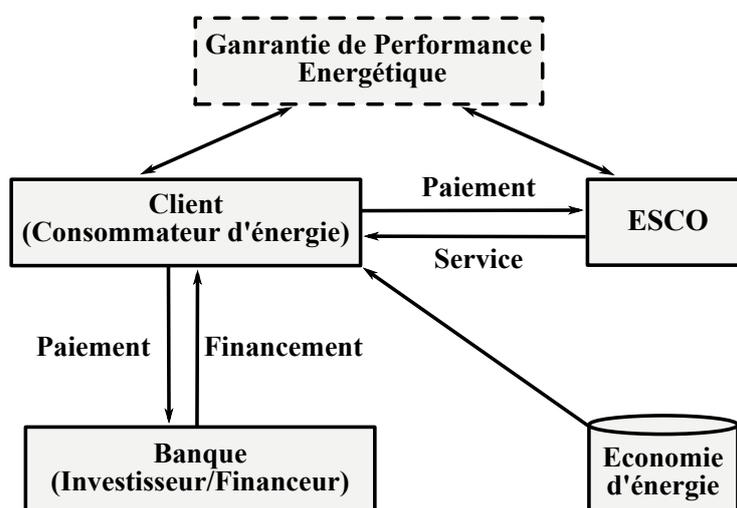


Figure 1.3 – Principe de la garantie de performance énergétiques.

La seconde forme de rémunération est le partage d'économie d'énergie illustré en Figure 1.4. Dans ce CPE, se sont également les ESCO qui conceptualisent, mettent en place et s'assurent du bon fonctionnement du projet, mais elles doivent également le financer. En contrepartie les économies financières sont partagées durant la durée du contrat entre les ESCO et le propriétaire selon un pourcentage fixé dans le contrat. Dans ce type de CPE, les ESCO assument la quasi-totalité des risques du projet (financier et de performance) c'est pourquoi ce type est parfois appelé *Service complet des ESCO (Full Service ESCOs)*. Ce type de CPE est relativement risqué pour les ESCO et contribue à créer de l'endettement chez elles. De plus, dans ce type de contrat les situations où les économies seraient bien supérieures aux attentes doivent être prises en compte, ce qui peut installer un climat de tension entre les ESCO et le propriétaire, les ESCO pouvant être tentés de minimiser les économies prévues pour réduire leurs risques et accroître leurs profits [144].

Une troisième mise en place de CPE peut être définie, c'est le modèle *Chaffee* présenté dans Figure 1.5. Dans ce modèle les économies d'énergie sont entièrement perçues par les ESCO, qui en contrepartie payent les factures d'énergie, sont responsables de l'O&M, des MCE et du remplacement des équipements [154]. Ce mode de fonctionnement pourrait être apparenté en France à un contrat de chauffage avec un mainteneur incluant les prestations P1 à P4 (*i.e.* fourniture, maintenance et conduite de chauffage, garantie et renouvellement du matériel, finance des rénovations ou en l'occurrence les MCE).

Dans les dix dernières années le marché mondial du CPE a glissé de la garantie de performance au partage d'économie, jusqu'à représenter 86% des CPE contractés aux USA [64]. Ceci s'explique par le fait que ce type de contrat est beaucoup plus sécurisant et moins contraignant (financièrement) du point de vue du propriétaire [37], mais également car ce modèle permet aux ESCO d'effectuer des gains significatifs à moyen terme avec des mesures de réglage de système. En revanche en France ce type de CPE est quasi-inexistant, ce qui peut s'expliquer par le fait que le tiers-financement soit en pratique presque entièrement mis en œuvre par les établissements ban-

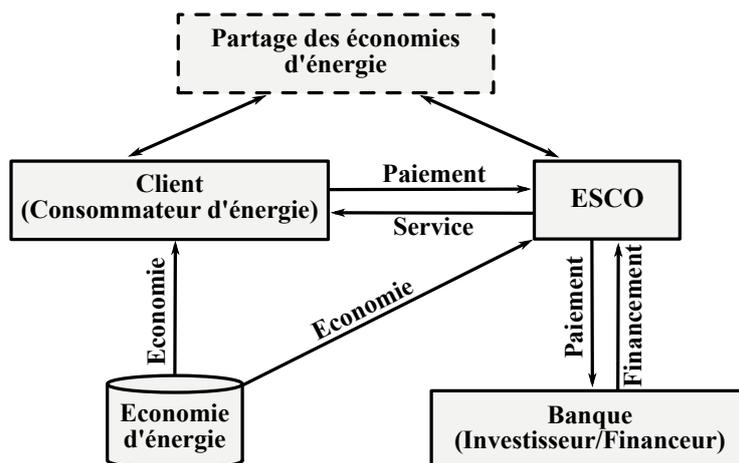


Figure 1.4 – Principe du partage des économies d'énergie.

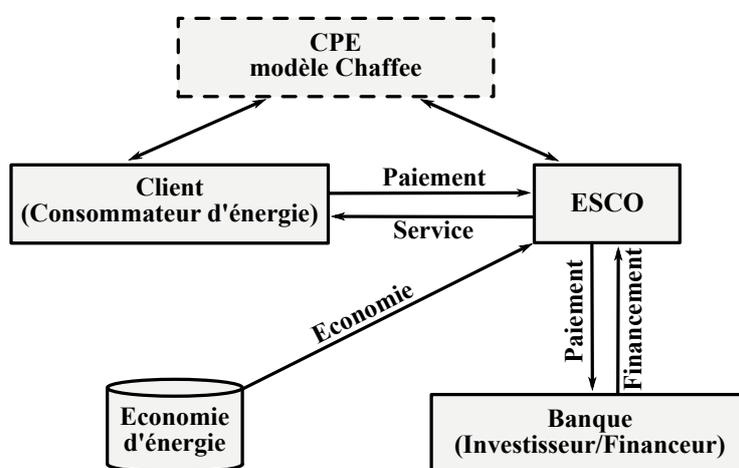


Figure 1.5 – Principe du modèle Chaffee.

caires, en raison de fortes obligations juridiques nécessaires à sa mise en place. En effet la réglementation française impose aux entreprises souhaitant effectuer une activité de tiers-financement de posséder un capital d'au moins deux millions d'euros, et d'être en possession d'une autorisation de l'Autorité des contrôles prudeniels et de résolution (loi du 17 aout 2015, et arrêté du 25 novembre 2015 des articles R518-73 et -74 du Code monétaire et financier).

### Les risques

Les CPE engageant une garantie de résultat comportent un certain risque pouvant entrainer le non-respect des engagements des ESCO. Afin de respecter les engagements contractualisés, des mesures de sécurité doivent être prises par les entreprises afin d'évaluer ces risques pour éviter les projets non viables, ou à risque trop élevé. Un processus de management des risques en deux étapes doit donc être mis en place. D'abord une phase d'analyse des risques ou les ESCO devront évaluer les risques potentiels et les prioriser, puis une phase de management des risques, cherchant à minimiser leur impact [62]. Ces mesures se situent durant le processus d'élaboration du CPE, comme durant la durée du contrat mais également en amont.

Une partie de ces risques a été référencée dans la littérature [106, 123]. Les principaux sont : les risques économiques (augmentation du coût de la construction ou des taux d'intérêts), financiers (défaut de paiement des intérêts), de conception (pauvreté des informations sur le bâtiment), de technologie (mauvais dimensionnement des équipements ou faible efficacité), opérationnels

(dégradation des performances, défauts), de mesure et vérification (données de mauvaise qualité).

En amont de l'élaboration du CPE les ESCO doivent être en mesure d'évaluer les risques liés aux projets ou aux clients et pour cela une phase de pré-qualification du client peut être mise en place [66]. Lors de l'estimation des économies engendrées par les MCE, l'impact des hypothèses et leurs conséquences sur les consommations doivent également être étudiées (par exemple au moyen de mise en place d'incertitude grâce à des analyses de sensibilité) [58]. Lors de la période de validité du contrat, les performances doivent être suivies et les économies vérifiées et ajustées par rapport à des paramètres dont les ESCO n'ont pas la responsabilité, appelées *variables d'ajustements*. Pour cela un protocole de vérification doit donc être déployé. La partie suivante présente l'un des protocoles de mesure et vérification (IPMVP) pouvant être mis en place dans le cadre de CPE.

### *La vérification*

L'efficacité des mesures de conservation d'énergie (MCE) mises en place par les ESCO doit pouvoir être évaluée. Néanmoins, il est impossible de mesurer directement une consommation d'énergie évitée. De plus les consommations des bâtiments et de leurs systèmes sont dépendantes d'une multitude de paramètres dont certains sont maîtrisables (*e.g.* les rendements, les consignes) et d'autres non (*e.g.* environnement, occupation). C'est pourquoi il a été développé des *plans de mesure et vérification*. L'objectif de ces plans est de normaliser un processus permettant d'estimer ces économies d'une façon robuste en fonction du cas d'étude. Il existe plusieurs de ces plans de mesure et vérification, mais trois sont particulièrement importants de par leur diffusion et utilisation. Le Protocole International de Mesure et de Vérification de la Performance Énergétique (IPMVP) (i), qui est un document décomposé en trois tomes et émis par l'Efficiency Valuation Organization (EVO) [57]. Le Guide n°14 *Measurement of Energy and Demand Savings* (iii) développé par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) [67]. Le Guide *Measurement and Verification of Federal Energy Project* (FEMP) (ii) créé par le département de l'énergie des États-Unis (DOE) [117]. Dans la suite de ce document les procédures de mesure et vérification seront présentées selon les standards de l'IPMVP, car celui-ci est le plus largement utilisé.

L'objectif de l'IPMVP (et des plans de mesure et vérification en général) est d'aider la mise en place des projets d'efficacité énergétique, en fournissant et décrivant les pratiques communes de mesure, de calcul et de suivi des économies effectuées dans un projet. Grâce à cette procédure faisant référence dans le domaine, des rapports permettant de vérifier les économies effectuées sont produits, ce qui rend les projets suivant l'IPMVP transparents et fiables.

L'IPMVP permet donc à travers un total de quatre options différentes de s'assurer et justifier de l'efficacité de MCE. Les différentes options permettent d'adapter le protocole aux objectifs du projet (site total, ou systèmes) mais également aux contraintes pratiques (absence de points de mesure, coût d'instrumentation vis-à-vis des économies attendues ...), afin d'optimiser la précision des estimations, en minimisant les coûts et les incertitudes.

Afin de pouvoir juger de l'efficacité d'une MCE, il faut être en mesure de distinguer ses effets sur les consommations et celles qui sont imputables à des paramètres influents sur la demande. C'est pourquoi l'IPMVP oblige d'étudier ce qui est appelé la *base de référence* c'est-à-dire les consommations du système ou du bâtiment visées par les mesures, avant que celles-ci ne soient mises en place. Ainsi il est possible d'établir une relation entre les facteurs influençant la consommation d'énergie. Grâce à l'équation de la base de référence, il est possible d'estimer, après la mise en place des MCE, la quantité d'énergie qui aurait été consommée dans les mêmes conditions sans leur implantation, ce qui est appelé la *base de référence ajustée*. Les économies réalisées ou les consommations d'énergie évitées, seront donc déterminées comme étant la différence entre la base de référence ajustée et l'énergie qui sera réellement mesurée durant la période de suivi, après la

mise en place des MCE. Cette méthodologie est illustrée par la Figure 1.6, et le calcul pour la consommation évitée peut être exprimée par l'équation généraliste ci-dessous.

$$G = C_{ref} - C_{suivi} \pm A_j \quad (1.1)$$

où  $G$  représente les gains en énergie ou les consommations évitées,  $C_{ref}$  est la consommation qui serait obtenue dans les conditions de référence,  $C_{suivi}$  la consommation mesurée durant la période de suivi, et  $A_j$  les divers ajustements possibles.

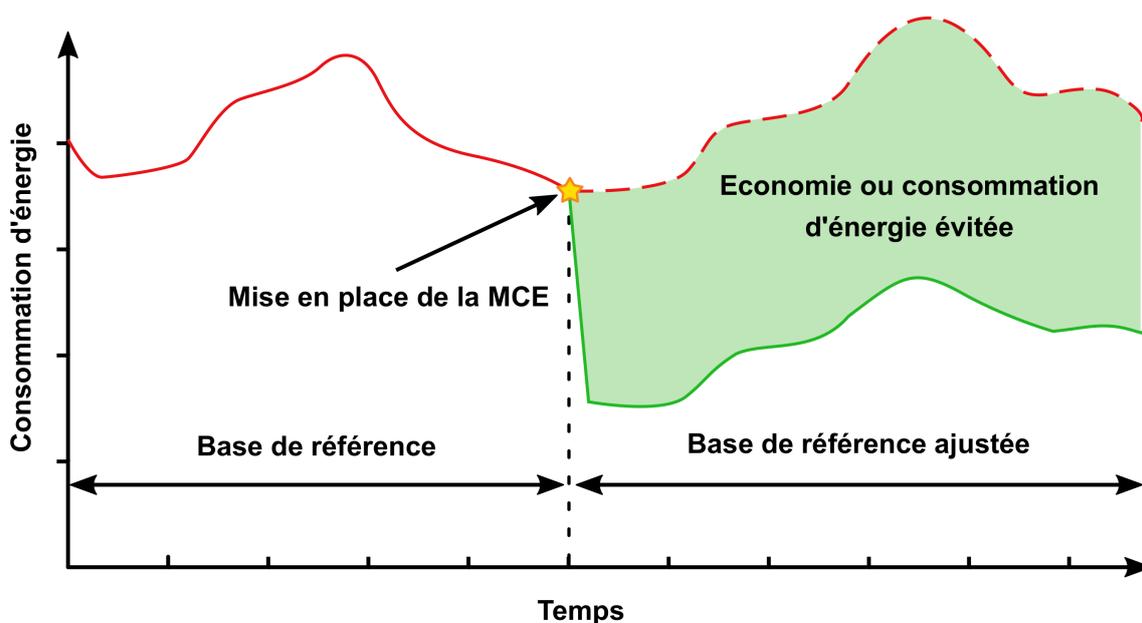


Figure 1.6 – Historique énergétique selon l'IPMVP.

L'IPMVP propose donc une méthodologie à suivre afin de préconiser, concevoir, mettre en place et vérifier l'efficacité des MCE. Ce processus généraliste se compose de neuf étapes principales, comprenant des actions à mener et l'élaboration de livrables (*e.g.* un plan de mesure et vérification). Le protocole IPMVP aide aussi les concepteurs des MCE dans la définition du cadre d'application de ces mesures, de ce qui doit être mesuré (relevé) et comment rendre les consommations comparables pour en déduire des économies.

Pour aider les ESCO ou les concepteurs à mettre en place des plans de mesure et vérification selon l'IPMVP, le protocole définit des types de *périmètre de mesure*. Ces derniers servent à savoir ce qui devra être pris en compte et mesuré dans le cadre des MCE. Ils sont fonction du projet, c'est-à-dire qu'ils dépendent du bâtiment en lui-même (neuf ou ancien, présence ou non de capteurs...), des MCE mis en place (simples ou nombreuses, avec interactions ou non...), mais également des attentes et intérêts du propriétaire ou de l'utilisateur. La définition d'un périmètre de mesure adéquate au projet permet de définir le type d'option au sens de l'IPMVP à mettre en place (définie ci-dessous), ainsi qu'à calculer et mettre en évidence au mieux les répercussions de l'intervention de l'ESCO (économie ou consommation évitée). Néanmoins, malgré la définition d'un périmètre de mesures, certains effets énergétiques dus à la mise en place de MCE peuvent ne pas être mis en évidence par les vérifications, mais impacter quand même les économies du projet. Ces effets sont appelés *effets interactifs*, ils doivent être estimés par le concepteur des MCE et inclus dans le Plan de mesures et vérifications (PMV).

L'un des points importants d'un PMV est le choix et la détermination des périodes à suivre. Il existe au sens de l'IPMVP, trois intervalles de temps important à surveiller, en fonction du

projet et des possibilités. (i) La période de référence, lorsque les projets concernent de l'existant. Cet intervalle de temps précède la mise en œuvre des MCE et doit couvrir complètement tous les modes de fonctionnement du site (*i.e.* prendre en compte différents modes de fonctionnement saisonniers). Si certaines données sont manquantes, il est possible de les remplacer par celles d'une année antérieure (le plus proche possible), représentative et dont les facteurs impactant la consommation (ou *variable indépendante*) sont connus. (ii) La période de suivi, qui intervient à la suite de la mise en place des MCE, devrait être établie sur la durée de vie de ces dernières, à défaut pendant au moins un cycle entier de fonction normale du système, ou du bâtiment. (iii) Les périodes adjacentes de mesure, qui ont lieu lorsque les MCE mises en place peuvent être actives ou non. Elles correspondent alors aux consommations d'énergie lors des différents modes de fonctionnement, afin d'être en mesure d'évaluer efficacement les économies engendrées.

L'IMPVP s'attache aussi à définir des types de corrections à appliquer aux mesures relevées, ainsi que la façon dont peuvent être comparées les consommations des différentes périodes. Les corrections ou plus précisément les ajustements sont calculés d'après des phénomènes physiques identifiés comme ayant un impact sur les consommations énergétiques du bâtiment et étant dans la périmètre de mesure. Elles sont repérées dans l'Équation 1.1 par le terme  $A_j$  et sont divisées en deux catégories, les *ajustements périodiques* et les *ajustements non périodiques*. Les ajustements périodiques correspondent aux paramètres ayant une influence sur les consommations qui changent régulièrement au cours de la période de suivi, alors que les non périodiques correspondent aux paramètres habituellement constants.

Après avoir défini les types d'ajustements possibles, le protocole détermine ce qu'il appelle la *base d'ajustement*. En effet les ajustements définis ci-dessus permettent de comparer deux consommations énergétiques basées sur un même ensemble de conditions. L'IPMVP définit deux types de base d'ajustement c'est-à-dire deux moyens de comparaison des consommations, la *consommation d'énergie évitée* et les *économies normalisées*.

La consommation d'énergie évitée correspond à la comparaison entre la consommation réelle durant la période de suivi et la consommation qui aurait été faite par le bâtiment ou le système en l'absence de la MCE. Cette estimation de la consommation qu'aurait eu le bâtiment est appelée *l'énergie de la base de référence ajustée*. Elle est effectuée au moyen d'un modèle mathématique liant les différentes variables indépendantes (identifiées sur le projet) aux consommations, appliqué aux mesures de ces variables durant la période de suivi.

L'autre base d'ajustement appelée *économies normalisées*, correspond comme son nom l'indique à une comparaison entre les consommations de la base de référence, et les consommations de la période de suivi (mesurées) normalisées par rapport à des conditions définies. Ces conditions fixes auxquelles sont ajustées les consommations peuvent être celles de la situation de référence ou arbitraires (dans ce cas deux modèles mathématiques différents sont nécessaires).

L'IPMVP recommande également fortement la mise en place de plans de mesure et vérification (étape quatre du processus de vérification de l'efficacité des MCE). Il définit treize points qui doivent y être contenus, plus quelques points supplémentaires en fonction des options.

Le contenu minimal d'un PMV comprend l'objectif des MCE, le choix de l'option retenue (voir sous-partie suivante) et le périmètre de mesure, la définition des conditions de la période de référence et de suivi, les variables d'ajustements, les procédures d'analyse et hypothèses (concernant les calculs d'économie), les caractéristiques des outils de mesure, les responsabilités, les coûts et précisions attendus, le format des livrables, et le type d'assurance qualité qui sera mis en place.

D'autres points importants de l'IPMVP concernent la réduction des incertitudes (liées aux mesures, aux estimations . . .), et au coût de l'évaluation des économies. Il définit également comment équilibrer ces parties importantes du processus qui s'opposent, afin d'obtenir un optimum. En effet l'augmentation de la précision se fait par un accroissement du coût lié à la mise en place d'outils de mesure, de remonté, ou à l'ingénierie. Un *garde-fou* est donc créé afin de définir la façon optimale de trouver cet équilibre : les coûts moyens annuels de M&V doivent rester inférieurs à 10% des économies annuelles moyennes prévues. Ainsi une fois les économies estimées dans le PMV,

l'enveloppe dédiée aux mesures et vérifications peut être établie et conditionne alors la précision et l'incertitude.

Le protocole IPMVP définit quatre options différentes permettant de déterminer les économies d'énergie effectuées par les MCE mises en place. Elles ont été créées afin de répondre à des problématiques liées par exemple aux périmètres de mesure, au manque ou incapacité à obtenir des données pour la période de référence. Sur ces quatre options, deux isolent les MCE pour calculer les économies d'énergie l'option A (i) et B (ii), l'option C (iii) prend en compte le site entier, et la dernière l'option D (vi) se base sur de la modélisation.

L'option A de l'IPMVP correspond à une option dans laquelle les économies effectuées sont calculées par MCE. Néanmoins, dans cette option tous les paramètres n'ont pas à être mesurés, c'est pourquoi elle est appelée *Isolement des MCE, mesure des paramètres clés*. En effet, le périmètre de mesure est réduit aux seuls systèmes, ou parties de bâtiment, ayant reçu les MCE. Les principaux paramètres (*i.e.* les plus influents) sont répertoriés, puis il est choisi lesquels seront mesurés ou estimés en fonction de leur impact sur l'incertitude entraînée sur les économies. Néanmoins, les estimations doivent être justifiées, leur influence sur les économies analysées et renseignées dans le PMV. Les économies estimées (issues de l'Équation 1.1) sont le résultat de la différence entre les valeurs mesurées et estimées. L'option A est la moins onéreuse à mettre en place, du fait que les estimations sont moins chères que la pose d'appareils de mesure.

L'option B, appelée *Isolement des MCE, mesure de tous les paramètres*, possède comme l'option A, un périmètre de mesure restreint. En revanche, elle exige que l'intégralité des paramètres étant utilisés pour le calcul des consommations évitées doit être issue de mesures. Comme pour l'option A, le périmètre de mesure réduit les variables indépendantes (paramètres ayant un impact sur la consommation d'énergie étudiée), mais il faut être vigilant sur les flux d'énergie sur le périmètre afin de pouvoir estimer les effets interactifs. Il est aussi à noter qu'en ce qui concerne les options de type isolement des MCE, il peut être nécessaire de mettre en place des compteurs supplémentaires afin de pouvoir effectuer l'isolement des mesures mises en place.

L'option C, ou option *Site entier*, diffère des deux précédentes car elle utilise les compteurs des fournisseurs (ou sous-compteur) afin de déterminer les économies réalisées. Elle implique donc souvent de nombreuses MCE, entraînant des consommations évitées importantes en comparaison des variations de consommation aléatoire du site. Dans cette option les interactions entre MCE ne seront donc pas prises en compte. Les économies engendrées par cette option doivent donc être flagrantes, typiquement supérieures à 10% des consommations de la période de référence pour une période de suivi de moins de deux ans. Dans cette option des modèles mathématiques sont utilisés pour définir les ajustements périodiques sur chacun des compteurs.

L'option D, dite de *Simulation calibrée*, détermine les économies à travers un logiciel de simulation numérique, qui sera calibré afin que les résultats puissent prédire le moins approximativement possible les données mesurées. Ainsi elle peut permettre d'estimer les économies réalisées par chacune des MCE (comme pour les options A ou B), ou d'un site entier (comme pour l'option C). Cette option est souvent retenue pour les constructions neuves, quand une partie d'un site doit être évalué indépendamment du reste, ou quand le site ne possédait pas de compteur lors de la période de référence, en somme quand les données initiales sont manquantes. La principale difficulté de cette option réside dans la qualité de la modélisation ainsi que dans son calibrage. Cette dernière est généralement réalisée à partir des factures mensuelles du bâtiment sur une année. Cette option peut, si elle s'applique sur plusieurs années, être remplacée par l'option C après la première année en utilisant les données de la première année comme base de référence.

L'IPMVP a défini un logigramme permettant de sélectionner des options en fonction du projet pour aider à les ESCO à faire le choix le plus judicieux vis-à-vis du bâtiment et des attentes.

Le protocole IPMVP est le plus largement diffusé, utilisé et reconnu des protocoles de M&V. Néanmoins, il existe dans la littérature d'autres protocoles de mesure et vérification pouvant être utilisés pour assurer les économies d'énergie réalisées dans le cadre de la mise en place de CPE [17, 62, 67, 117].

### 1.1.3 Objectif de la thèse

La mise en place des mesures réglementaires ou incitatives présentées précédemment ont indéniablement participé à l'amélioration de la performance énergétique globale des bâtiments. Néanmoins, on constate encore que des bâtiments échouent à remplir certaines de leur fonctions principales. Par exemple, ne pas assurer un environnement intérieur de qualité, ou en ayant des consommations d'énergie ou des coûts de maintenance excessifs. Ces problèmes peuvent avoir plusieurs causes différentes tels que des problèmes de conception, de construction, ou d'O&M (*Operation and Maintenance*). Leurs répercussions peuvent varier de surcoûts en maintenance à la chute de productivité (*e.g.* syndrome du bâtiment malsain) comme à des problèmes de santé des occupants [14]. De plus, l'augmentation de l'intérêt du monde de la recherche concernant la mesure et l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments neufs depuis quelques années a mis en évidence l'existence d'un écart de performance entre prévision et ce qui est atteint [25, 65, 143]. Cela est illustré par les différences entre les consommations calculées (issues de simulation) et les consommations réelles (mesurées sur site) [34]. Ces écarts peuvent être extrêmement importants, les mesures allant jusqu'à atteindre 2.5 fois les estimations [34]. Pour les différences de consommation d'énergie constatées, les causes les plus importantes sont dues aux incertitudes de modélisation (*e.g.* concernant l'occupation) ou à de mauvais fonctionnements des systèmes (O&M) [169].

Comblent cet écart entre les prédictions et les mesures est donc un enjeu crucial aux regards des ambitions fixées en matière d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment (*e.g.* les objectifs pour 2050 et l'avènement des NZEB etc.). De plus, l'arrivée et l'augmentation de la contractualisation de performance ou d'économie d'énergie par le biais des CPE, induit une nécessité de réduction de ces écarts pour des raisons économiques comme juridiques [3, 34, 186].

Les systèmes CVC représentent la part la plus conséquente de la consommation énergétique des bâtiments, avec environ 50 % pour les bâtiments de bureau [68, 139]. Ils sont également l'une des causes principales des écarts entre prédictions et consommations réelles, à cause de divers problèmes de dimensionnement, de fonctionnement, de réglage, de maintenance ou de défauts pour ne citer que quelques raisons [142, 184]. Ainsi, plusieurs outils se sont développés afin de réduire ces écarts de performance et d'être en mesure d'assurer des consommations, mais également de simplement réduire les consommations des bâtiments. De nombreuses études ont été menées et ont conduit à la mise en avant de deux mesures efficaces, à savoir le commissionnement des bâtiments (ou *Commissioning*) et la détection de défauts et le diagnostics (FDD) [4, 15, 69, 83, 122]. Ces outils permettent la mise en place de contrat de performance plus fiable en assurant en moyenne des économies de l'ordre de 20 % à 30 % sur les systèmes [102]. En plus de réaliser des économies d'énergie elles induisent un accroissement de la durée de vie des équipements, un meilleur maintien des conditions intérieures. Ces travaux de thèse portent donc sur le commissionnement et les méthodes de FDD avec pour objectif de proposer de nouvelles approches plus performantes.

## 1.2 État de l'art des méthodes de commissionnement et de FDD

Dans cette Section une revue bibliographique des méthodes de commissionnement et de FDD est développée.

### 1.2.1 Le Commissioning

Le *commissioning* (Cx), ou commissionnement en français, est une pratique issue de l'industrie navale. Ainsi, un navire ayant subi un processus de *commissioning* était alors jugé apte à servir, et pouvait donc partir en mer. Ce processus consiste en une série d'étapes servant à tester la mise en œuvre et la qualité des équipements, à mettre en évidence les problèmes et défauts et à les corriger, ainsi qu'à former et entraîner l'équipage. Une fois ce processus d'assurance qualité entièrement effectué et réussi, alors l'embarcation est considérée comme ayant fait l'objet d'un commissioning.

#### 1.2.1.1 Introduction

Le *commissioning* des bâtiments a fait son apparition dans les années 1970-1980, avec sa forme la plus comparable à celle de sa définition initiale via le *commissioning* des bâtiments neufs, puis comme une mesure d'économie d'énergie généralisée entre les années 1980 et 1990 [27, 180].

Dans les années 1990 deux projets ont été menés dans le cadre du programme Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) de l'International Energy Agency (IEA). Leurs objectifs sont de développer des outils servant à la détection et aux diagnostics des défauts, ainsi que leur implémentation dans les bâtiments. La mise en place de ces outils dans les bâtiments existants doit servir à repérer les problèmes ou défaillances des systèmes, dès leur apparition et aider à leur résolution. Suite à l'étude de ces outils dans des bâtiments du monde entier, un rude constat est fait : la plupart des bâtiments étudiés n'ont jamais fonctionné correctement ! C'est pourquoi l'ECBCS a ensuite développé le projet de l'*Annex 40 : Commissioning tools for improved building energy performance* entre 2001 et 2004, afin de diminuer l'importance de la correction de problèmes initiaux dans le bâtiment, par rapport à l'apparition de nouveaux problèmes. L'*Annex 40* encadre, crée, teste et valide des outils pour le commissioning des bâtiments, c'est-à-dire qui portent sur la vérification et l'optimisation des performances énergétiques, en tenant compte de l'impact sur le confort et la consommation.

Puis en 2005 l'ECBCS lance un autre programme l'*Annex 47 : Cost-effective commissioning for existing and low energy buildings*. Ce projet a l'ambition de rendre le Cx économiquement rentable pour les bâtiments neufs comme existants afin d'améliorer la performance lors du fonctionnement des systèmes, et ainsi encore réduire les consommations des bâtiments. Ainsi dans cette Annexe de nombreuses techniques et outils de Cx sont développés afin de pouvoir être utilisés en opération et maintenance des bâtiments plutôt que les méthodes traditionnelles *intuitives* [40].

Dans le domaine du Génie Civil, le commissioning peut revêtir plusieurs formes et significations en fonction du moment où il est effectué. En effet dans le bâtiment la démarche de commissioning sur des bâtiments neufs désignée de *Initial Commissioning* ou commissionnement initial (ICx), n'a rien à voir avec le *Commissionnement de bâtiment existant* (CxBE), s'effectuant sur des bâtiments déjà réceptionnés et ayant, ou non, fait l'objet d'un ICx.

D'après l'*ASHRAE Guideline 0 : The Commissioning Process*, le commissioning est un processus axé sur la qualité, dont l'objectif est de vérifier et d'attester que le rendement des installations et des systèmes répond aux critères et objectifs fixés [4]. L'intérêt du commissioning réside dans le fait que ce processus de vérification systématique du fonctionnement des systèmes (vis-à-vis de la conception), mais également des interactions que les systèmes peuvent avoir entre eux comme de leurs incidences, les besoins d'investissement lourd pour l'amélioration des systèmes sont diminués, et les temps de retour sur investissement pour ces mesures sont très courtes. Néanmoins le Cx se situe à la tête de la pyramide des besoins des bâtiments comme le montre la

Figure 1.7. Il nécessite donc pour pouvoir être correctement mis en place la présence de GTB, ce qui est d'autant plus vrai pour le commissioning des bâtiments existants [39].

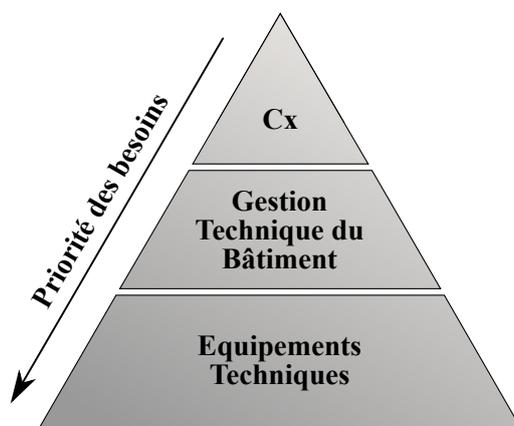


Figure 1.7 – Hiérarchie des besoins du bâtiment.

### 1.2.1.2 Les différentes formes de Commissioning

Bien que regroupés sous le même mot, plusieurs concepts relativement différents cohabitent à travers la notion de commissioning. Une division de ces concepts en fonction de leur objet d'application semble pertinente car elle permet également de bien séparer les objectifs de ces différents Cx. La principale séparation est celle réalisée entre les bâtiments neufs et les bâtiments existants. Les différents types de Cx sont donc présentés dans ce chapitre et regroupés selon l'état de construction auquel ils s'appliquent.

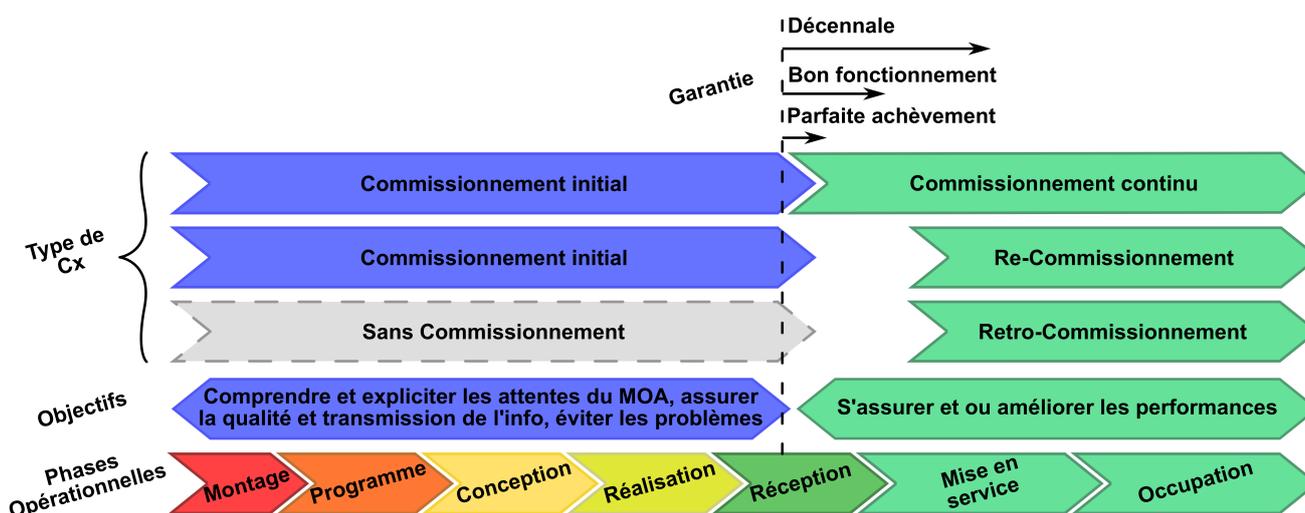


Figure 1.8 – Commissioning dans les marchés.

#### Commissioning des bâtiments neufs

Le commissionnement des bâtiments neufs est connu sous le nom de commissionnement initial (ICx). C'est un processus axé sur la qualité, qui commence dès les premières phases d'un projet (idéalement dès la préconception) et se poursuit durant l'année de parfait achèvement. L'objectif

de cette démarche qualité est de s'assurer, vérifier et d'attester que les rendements des installations et des systèmes correspondent aux objectifs fixés. Pour cela une procédure est mise en place dès le début d'un projet de construction s'étalant sur les différentes phases définies par la loi MOP. Ainsi les attentes du maître d'ouvrage (propriétaire) sont clairement définies et il peut être vérifié que celles-ci soient bien prises en compte et respectées par les différentes parties prenantes du projet. Cela va pouvoir permettre que le personnel reprenant en charge les équipements soit en mesure de les piloter et de les maintenir correctement. Comme l'ICx est un processus et non pas une procédure, celui-ci n'est pas rigoureusement normé et a vocation à être adapté au projet comme aux acteurs et ambitions visées. Néanmoins, son application si elle est correctement effectuée doit permettre de s'assurer de l'efficacité des systèmes de façon fiable et durable, en détectant et traitant les problèmes dès leur apparition et ainsi éviter les choix et solutions de fortune.

Pour le garantir, le Cx est assuré par ce que l'on appelle l'Autorité de commissioning (ACx), qui assumera la responsabilité du bon déroulement de la procédure. Cette personne, définie dès le début du projet, aura la tâche de définir l'équipe de Cx ainsi que le rôle et les responsabilités de chacun, de les formaliser et de s'assurer que la démarche de Cx est bien suivie et correctement effectuée. Les principales étapes du ICx concernent : (i) la mise en évidence et la formalisation des exigences du propriétaire sur le fonctionnement et les rendements, (ii) la vérification et l'attestation que ces exigences soient respectées, (iii) la fourniture des documents et outils nécessaires à l'équipe du projet leur permettant de fournir des livrables de qualité, (iv) l'assurance que le propriétaire et son équipe (ou gestionnaire) reçoivent l'intégralité des documents concernant les systèmes ainsi qu'une formation pour le maintien des rendements et (v) coordonner le Cx en intégrant et informant l'ensemble des acteurs tout au long des différentes phases du projet. Dans la pratique l'ACx peut être assuré par différentes personnes : un consultant indépendant en Cx ou le personnel du propriétaire, un ingénieur de conception ou architecte, un entrepreneur seul ou vérifié par un consultant indépendant en Cx.

Pour être efficace le processus de Cx doit donc être correctement dirigé, ce qui implique que l'ACx doit monter et suivre le plan de commissioning. Cet outil clé formalise à toutes les parties prenantes ce qui est attendu du commissionnement, ainsi que la quantité de travail et d'argent que cela va devoir représenter. Il existe plusieurs formes de plan de Cx possédant des niveaux de détail et donc de fiabilité du processus de Cx différents. Les trois principaux outils sont (i) la check-list, (ii) le modèle standard de plan de commissionnement et (iii) la matrice de contrôle qualité. La check-list (i), comme son nom l'indique, est une simple liste d'actions de vérification à effectuer. Elle correspond au plus bas niveau de détail en terme de plan de commissionnement. Les descriptions types sont spécifiques à chacun des systèmes.

Le modèle standard de plan de Cx (Standard Models of Commissioning Plans) (ii), est le niveau intermédiaire de plan de commissionnement. C'est un modèle qui a été développé dans le cadre de l'*Annex 40*. Il en existe au moins cinq en fonction du bâtiment, de la complexité des systèmes, du niveau de risque souhaité et des moyens du MOA.

La matrice de contrôle qualité (Matrix for Quality control) (iii), est l'outil le plus détaillé pour la création de plans de Cx. Cet outil exhaustif est souvent basé sur des logiciels tableurs (de type Microsoft Excel<sup>MD</sup>). Il est utilisé afin de planifier, prendre des décisions et stocker des informations. Ainsi la qualité globale des systèmes énergétiques peut être vérifiée car les matrices permettent de contrôler le processus sur l'intégralité de la phase de réalisation. Les performances du système sont donc considérées en fonction de ses spécifications initiales.

### *Commissioning des bâtiments existants*

Il existe différentes formes de commissionnement des bâtiments existants en fonction des antécédents du bâtiment, des objectifs et des moyens mis en œuvre. C'est trois différentes formes sont (i) le Retro-commissioning (RetroCx), (ii) le Re-commissioning (RCx) et (iii) et le Continuous commissioning (CCx) aussi appelé On-going commissioning.

Le RetroCx (*i*) est une variante du Cx ayant lieu sur les bâtiments n'ayant jamais eu à faire à un ICx ou à toutes autres formes de Cx. Son objectif est de s'assurer que les systèmes et équipements fonctionnent correctement ensemble, et d'essayer d'atteindre les performances de fonctionnement et rendements des systèmes initialement prévues en phase conception. L'optimisation du fonctionnement des systèmes passe par la correction de problèmes rencontrés en phase projet (*i.e.* conception), et au cours de la période d'occupation du bâtiment. Afin de maintenir le fonctionnement *optimal* obtenu grâce à cette méthode ponctuelle, il peut être conseillé de mettre en place par la suite du recommissioning. La démarche de mise en place du Retro-commissioning est la même que celle du Re-commissioning.

Le RCx (*ii*) est un processus s'appliquant sur les bâtiments ayant déjà subi un ICx ou un RetroCx. Le Re-commissioning consiste dans la vérification que l'optimisation du bâtiment et de ses systèmes soit maintenue ainsi que dans la mise en évidence et la mise en place des solutions pour y arriver. Le RCx tend donc à ré-optimiser les bâtiments et leurs systèmes afin d'assurer un confort optimal en fonction de l'occupation, tout en réduisant les consommations. Pour atteindre ces objectifs le RCx s'attache particulièrement aux mesures dites sans frais ou à peu de frais, et donc possède des temps de retour sur investissement généralement très courts (globalement inférieurs à deux ans). En plus de permettre de réaliser des économies d'énergie fréquemment comprises entre  $1,00 \cdot m^{-2}$  et  $8,00 \cdot m^{-2}$ , le RCx induit des économies indirectes difficiles à quantifier mais non négligeables. Par exemple elle augmente la valeur du bien immobilier, permet de former le personnel de maintenance et d'exploitation, d'établir une documentation à jour du bâtiment et d'améliorer la qualité de l'environnement intérieur.

La mise en place de ce processus est effectuée comme pour l'ICx par l'équipe de commissioning qui se compose généralement du propriétaire (ou d'un représentant), du personnel du bâtiment (ou de l'équipe du gestionnaire), d'un consultant en RCx (équivalent de l'ACx), et possiblement des acteurs de la construction (équipes de conception, fabricants etc). Les rôles et responsabilités de chacun de ces acteurs devront être clairement définis dès le début du RCx. En fonction des disponibilités et des compétences de l'équipe technique du propriétaire, l'implication du consultant peut être modulée, allant de la supervision totale du projet, à la formation du personnel pour les prochains projets.

Les projets de RCx s'articulent en généralement en quatre étapes principales, (*a*) la planification, (*b*) l'investigation, (*c*) l'implantation et pour finir (*d*) la phase de transfert et les stratégies de persistance.

Concernant la phase de planification (*a*), si le projet de RCx s'applique à un parc de bâtiments, alors la première étape consiste en la sélection des bâtiments potentiels pour un recommissioning (à travers par exemple l'élaboration de cotes d'intensité énergétique des bâtiments). Cette tâche peut être réalisée par le propriétaire du bâtiment ou alors par le consultant. Dans le second cas, la sélection du consultant et de l'équipe de Cx est la première étape. Ensuite une inspection du bâtiment est effectuée, les *exigences opérationnelles du propriétaire* sont formalisées et un *plan de RCx* est émis (voir un rapport d'évaluation du RCx). Ce document fixe le cadre du projet, l'objectif, sur quoi le projet va s'appliquer, les rôles et responsabilités des acteurs, le format des rendus, les échéances etc.

La phase d'investigation (*b*) consiste en l'examen du bâtiment, de l'exploitation et de l'entretien de ses systèmes. Ainsi il est possible de percevoir leur fonctionnement et interaction, pour pouvoir détecter les problèmes. Pratiquement cette investigation se fait par l'étude de la documentation des équipements, des entretiens avec le personnel, du contrôle ou monitoring ainsi que des essais fonctionnels. Ensuite après avoir identifié les dysfonctionnements et mesures pour y remédier, elles sont priorisées avec le propriétaire pour correspondre au budget et exigences opérationnelles. Alors le consultant en RCx peut établir le *registre des mesures*, où sont renseignées et numérotées les mesures, leur coût d'investissement et les économies attendues etc. Un *rapport d'investigation* peut également être produit.

Durant la phase d'implantation (*c*) après que le propriétaire ait défini la méthode d'implantation (implication du consultant), ainsi que les mesures qui seront mises en place d'après le registre des mesures, le consultant va créer le *plan d'implantation*. La forme de ce plan est variable selon la méthode d'implantation retenue, mais doit énoncer les travaux à mettre en œuvre pour l'application des mesures, les résultats attendus suite à leur mise en place, ainsi que la façon dont ces résultats doivent être vérifiés. Les mesures une fois implémentées et vérifiées, entraînent alors un nouveau référentiel pour le bâtiment (e.g. intensité énergétique etc).

La phase de transfert et les stratégies de persistance est la dernière phase d'un projet de RCx. Lors de cette étape le *rapport final de RCx* est rendu au propriétaire. Ce document contient l'intégralité des livrables et documents importants en lien au projet. Il devra par la suite être mis à disposition du personnel sur le site pour un l'O&M. L'établissement ou la mise à jour de la documentation du bâtiment tel que la liste des équipements, les manuels d'O&M et les documents portants sur les systèmes de gestion et de contrôle (liste de points, analyses fonctionnelles, manuels et schémas de principe des systèmes) doit être effectué durant cette phase. Une formation ainsi qu'une sensibilisation du personnel en charge du bâtiment devra également être prévue par le consultant en RCx.

Le commissionnement continu (*iii*) est une démarche qui consiste à suivre continuellement un bâtiment afin de pouvoir identifier rapidement lorsque des dérives ou problèmes apparaissent au niveau des systèmes pour pouvoir les régler. Ce type de Cx s'applique donc sur les problèmes de fonctionnement et de confort, sur l'optimisation de la consommation d'énergie, l'identification des rénovations possibles etc. Pratiquement le CCx se met en place grâce aux systèmes de GTC ou GTB. C'est en utilisant les informations remontées par ces systèmes que les problèmes sont mis en évidence et peuvent être traités physiquement (par une opération de maintenance) ou ré-réglés (à travers le système de GTB). Le CCx n'est pas forcément une démarche s'appliquant uniquement aux performances énergétiques des équipements, mais peut également être orienté sur des problématiques de confort ou de qualité de l'air intérieur et donc chercher à améliorer l'environnement intérieur.

L'une des principales différences entre le CCx et les autres formes de Cx, réside dans les objectifs visés par cette démarche continue. Contrairement aux différentes formes de Cx qui cherchent à ramener et maintenir les performances des différents systèmes aux valeurs obtenues en conception, le CCx est dans une optique d'amélioration perpétuelle. L'objectif étant d'atteindre les conditions de fonctionnement optimales de chacun des systèmes et pour toutes les conditions possibles.

Comme pour toutes les formes de commissionnement, une équipe de Cx est mise en place afin de mener à bien le projet. Cette équipe est constituée de l'ACx (MOA, représentant du MOA ou consultant en CCx), d'ingénieurs et de techniciens en CCx et d'au moins un membre de l'équipe technique.

La démarche de CCx peut être décomposée en deux phases vis-à-vis de la signature du contrat. Ces phases comportent les quatre mêmes étapes type que les projets de RCx et bien que leurs objectifs soient similaires leur déroulement est différent. Les deux phases d'une démarche de CCx sont [120], (*a*) la phase de développement du projet, (*b*) la phase d'implémentation et de vérification.

Tout d'abord la phase de développement du projet (*a*), regroupe les deux premières étapes des projets de RCx, c'est-à-dire la phase de planification et la phase d'investigation. La phase de développement du projet se situe en amont de la signature du contrat de CCx. Elle permet donc de définir clairement le cadre du projet grâce à des documents comme le registre de mesure, ou le rapport d'investigation. C'est à la suite de cette étape et de l'étude de ses livrables qu'un contrat peut être signé.

Une fois le contrat signé, la seconde phase peut donc démarrer. C'est la phase d'implémentation et de vérification (*b*), elle comporte les deux autres étapes d'un projet de Cx, l'étape d'implantation et de persistance. L'étape d'implantation peut également être divisée en plusieurs sous-

parties qui sont, le choix de la méthode d'implantation, la définition des conditions de base, l'analyse et le développement des mesures, l'implémentation des mesures, la vérification des économies ou améliorations. Ces sous-parties seront également des chapitres ou sous-parties du rapport de Cx et certaines comporteront des livrables additionnels. Pour finir l'étape de persistance est menée où les bénéfices des mesures doivent être maintenus et vérifiés.

Pour conclure, il est important de noter que le cadre et la méthodologie des Cx sont très larges et peu précis. Cela permet de répondre à toute les problématiques existantes mais sans entrer dans les spécificités concernant des cas particuliers, ce qui est l'une des caractéristique intrinsèques des processus.

Concernant le Cx des bâtiments existants, il peut donc être divisé en deux sous-catégories, les Cx *ponctuels mais répétitifs* avec le RCx et le RetroCx et les Cx *continus* avec le CCx. Les Cx *ponctuels et réguliers* sont généralement mis en œuvre lors de changement d'utilisation ou de vocation du bâtiment, d'identification de diminution des performances ou de manière régulière (tous les 3 à 5 ans). Ces types de commissionnement se basent plutôt sur les performances initialement calculées pour le bâtiment en phase de conception. Tandis que le CCx a lieu de façon ininterrompue et met l'accent sur l'optimisation continue des performances des systèmes et du bâtiment. La Figure 1.9 illustre les différentes économies possibles sur les consommations d'énergie en fonction du type de Cx appliqué.

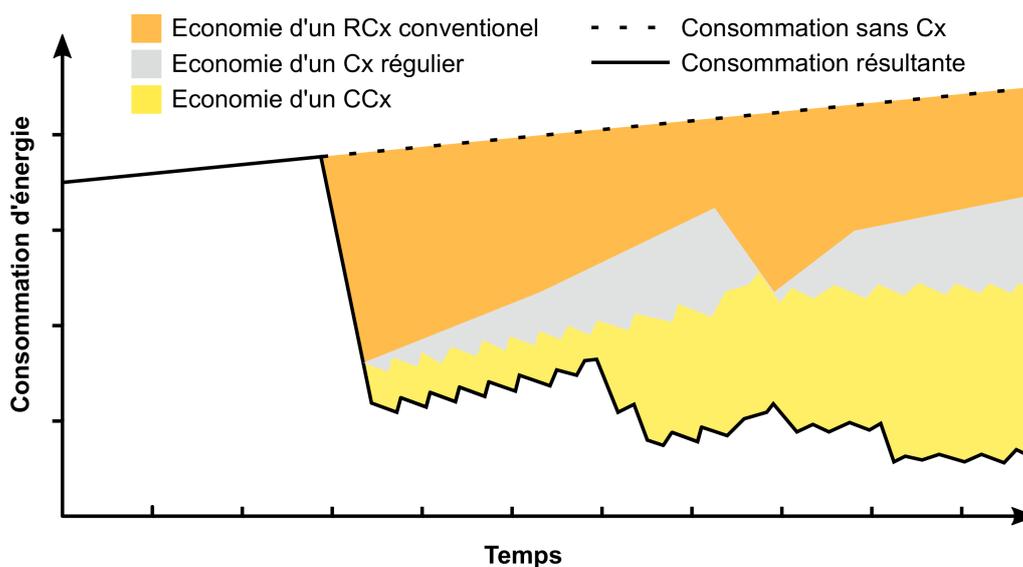


Figure 1.9 – Évolution des consommation selon le type de Cx.

Le commissionnement des bâtiments s'avère relativement efficace et viable que ce soit pour des objectifs de réduction des consommations énergétiques, d'entretien des systèmes ou d'optimisation des conditions intérieures. En revanche celui-ci est la plupart du temps réalisé de façon *manuelle* par l'ACx ou les équipes formées. Le commissionnement des systèmes est réalisé en suivant les procédures de contrôles des équipements et en analysant les données de ces derniers.

Il existe en revanche un domaine qui cherche à automatiser ces tâches d'analyse des données et de traque des problèmes de fonctionnement, c'est la détection de défauts et le diagnostic (FDD). En effet, ces méthodes servent à identifier lorsqu'un dysfonctionnement se produit dans les systèmes et à déterminer sa localisation et sa cause. Ces méthodes permettent donc d'assister et d'automatiser certaines missions du commissionnement.

## 1.2.2 La Détection de défauts et le diagnostic

### 1.2.2.1 Introduction

Afin de réduire les consommations d'énergie, et plus précisément celles qui ne seraient ni souhaitées, ni nécessaires, il fut développé par l'Annexe 25 de l'ECBCS, l'optimisation de bâtiments et la détection de défauts. Ce processus cherche à minimiser les coûts d'exploitation sans diminuer la qualité de l'air intérieur ou le confort thermique. Pour y parvenir l'objectif est d'atteindre un contrôle optimal des systèmes (CVC) et de la détection (voir de la correction) de défauts [81]. La détection de défauts et le diagnostic (FDD pour *Fault detection and diagnosis* en Anglais) constituent la majeure partie de l'optimisation de bâtiments et la détection de défauts ce qui est d'ailleurs la seule partie traitée par l'Annexe 25 .

Dans ce domaine un défaut peut être considéré comme un événement ou une condition entraînant au sein du bâtiment une mauvaise efficacité en terme énergétique, un problème d'inconfort, ou plus précisément une dérive dans les conditions d'opération fixées [81]. La FDD se fixe donc comme objectif de repérer rapidement lorsqu'un défaut fait son apparition et d'être en mesure, une fois la défaillance identifiée de déterminer la cause de son apparition. Cela entraîne donc l'intervention rapide de la maintenance ce qui permet d'éviter une perte d'efficacité significative et de réduire les dommages potentiels pouvant être infligés aux systèmes, ou leur mise en défaut.

La FDD est permise grâce à la remontée d'informations (données) issues de systèmes de surveillance (monitoring). Elle peut être appliquée à un système, comme un composant ou même le bâtiment dans son ensemble. Néanmoins bien que depuis le milieu des années 70 ce domaine soit vraiment développé dans les domaines de l'aérospatiale, industrie chimique... , il n'est encore que trop peu mis en pratique dans le secteur du bâtiment [94].

Dans les faits la FDD peut être décomposée en deux principales sous-catégories qui sont, la détection du défaut (FD) et le diagnostic du défaut (DD). Les défauts sont identifiés (mais également diagnostiqués) par un processus en deux étapes le prétraitement puis la classification [80]. L'identification par une phase de prétraitement (*pre-processing*) est effectuée en comparant des valeurs mesurées à des valeurs attendues et s'il n'existe pas de différence ou résidu alors il n'y a pas de faute. En revanche s'il y en a une on passe à une phase de classification. Cette phase, souvent grâce à l'utilisation de système expert ou de logique floue imitant une expertise humaine, détermine si un défaut a réellement lieu (FD), puis quelle est son origine (DD) [61]. La phase de classification s'effectue grâce à l'élaboration d'une connaissance et à un processus d'inférence. Le principe du déroulement des étapes de la détection de défauts est présenté dans la Figure 1.10.

Il existe deux grands types de défauts, les *hard failures* ou *hard faults* entraînant une nécessité d'intervention immédiate (*e.g.* panne d'un moteur) et les *performance degradation* ou *soft faults* devant être analysées au regard du degré d'importance des répercussions et du coût de l'intervention dans la phase d'évaluation. Dans la pratique, pour engendrer une intervention de maintenance, l'impact d'un défaut doit couvrir le coût de l'intervention. Pour cela les défauts diagnostiqués sont souvent évalués au regard de quatre critères : économique, de confort, de sécurité et environnemental. Bien que spécifiques et complexes à mettre en place, les seuils d'intervention sont nécessaires pour chacun de ces critères, pour éviter tout danger (humain et environnemental), plainte et perte d'argent (*e.g.* gaspillage d'énergie). Une fois mis en place ces seuils permettent l'estimation de l'importance du défaut et donc la rapidité d'intervention. Cette dernière phase est appelée phase de décision. Des choix proposés pour la phase de décision sont par exemple : toléré, toléré mais intervention rapide, adapter le contrôle et mettre hors tension jusqu'à l'intervention [81].

### 1.2.2.2 Les approches

La FDD se différencie du simple monitoring parce que les informations recueillies sont traitées afin d'évaluer et d'isoler le problème, et non pas seulement de le mettre en évidence. La

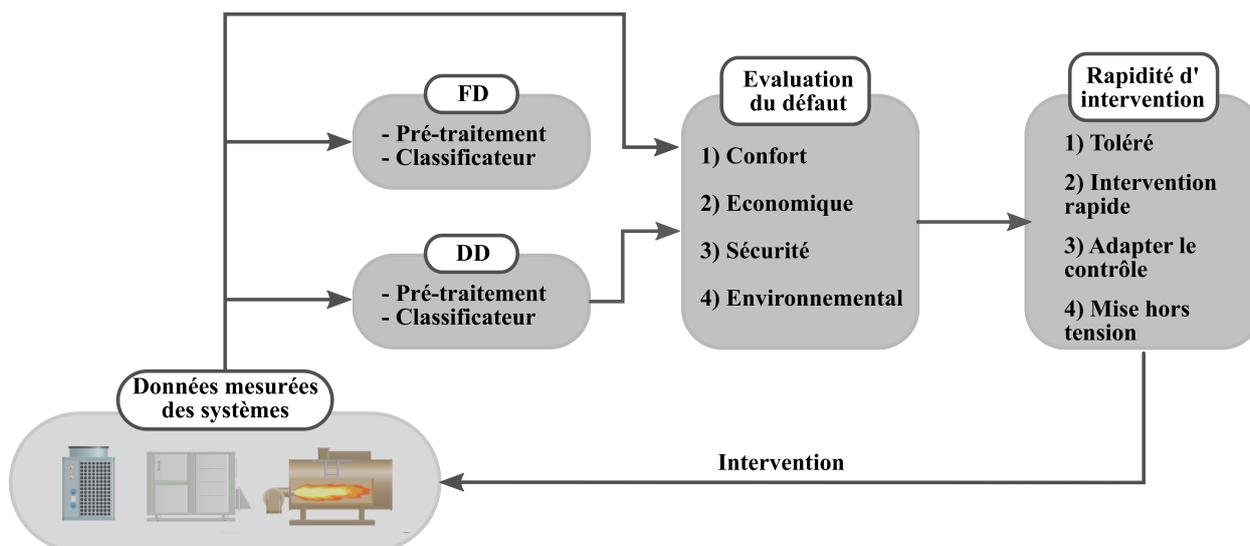


Figure 1.10 – Déroulement de la FDD.

détection de défauts et le diagnostic ont connu de nombreuses classifications depuis les années 70 [22, 81, 85, 94, 180]. Nous présenterons les différentes méthodes de FDD d'après une classification qui distingue trois méthodes de détection de défauts et de diagnostics [182], celles basées sur l'analyse, celles basées sur l'expertise (ou la connaissance) et les méthodes basées sur les données mesurées. Chacune de ces méthodes est sous-divisée en catégories qui seront succinctement présentées.

#### Méthodes basées sur l'analyse

Ces méthodes de FDD détectent et diagnostiquent les défauts apparaissant dans un système grâce à la comparaison entre des données mesurées sur le système et des données de sortie issues de modèles représentant le système en question. Il existe deux catégories de méthodes basées sur l'analyse qui sont l'estimation de paramètres et le résidu sur la sortie.

**Le résidu sur la sortie.** Dans cette méthode la valeur réglante (valeur d'entrée) et la valeur réglée (de sortie) d'un système sont relevées. La valeur de sortie réelle est comparée à celle obtenue par un modèle mathématique simulant le système, ayant pour entrée la même valeur réglante. Avec la méthode du résidu sur la sortie on cherche donc un changement (différence) sur des valeurs directement mesurables. Un défaut apparaît donc lorsque la différence entre les sorties du système et les sorties du modèle excèdent un seuil préalablement fixé. La Figure 1.11 adaptée de [80] présente ce principe. Cette méthode est très efficace pour la détection de défauts et peut permettre dans certaines conditions de fournir des diagnostics.

Pour prendre en compte l'influence de perturbations et de bruits une *estimation d'état* (tel que des *Observers* comme le filtre de KALMAN) ou bien des relations de parité sont préconisées. Ces méthodes prennent en compte l'influence de variables incertaines grâce aux données d'entrée et de sortie du système, aux valeurs théoriques issues du modèle, et à des modèles statistiques modélisant des entrées inconnues. Ce type d'approche cherche à faire converger les résultats en minimisant la variance de l'erreur d'estimation et donc permettent d'atténuer les incertitudes en accordant plus d'importance à ce qui est certain.

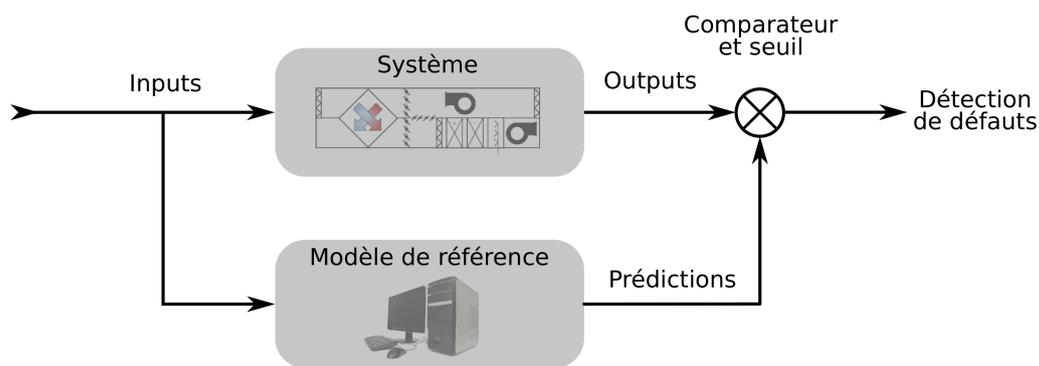


Figure 1.11 – Méthode du résidu sur la sortie.

**L'estimation de paramètres.** Cette méthode permet de détecter des variations de paramètres non mesurables directement, son principe est présenté dans la Figure 1.12 adaptée de [80]. Pour cela une variable de sortie du système sera comparée à la même variable issue d'un modèle représentant le système ayant reçu les mêmes données d'entrée que le système. Puis une fonction va chercher quelle variation de paramètres du modèle permet de minimiser la différence sur les variables de sortie. La présence d'un résidu et son ampleur deviennent donc l'indication d'un défaut et le paramètre à ajuster en donne une estimation.

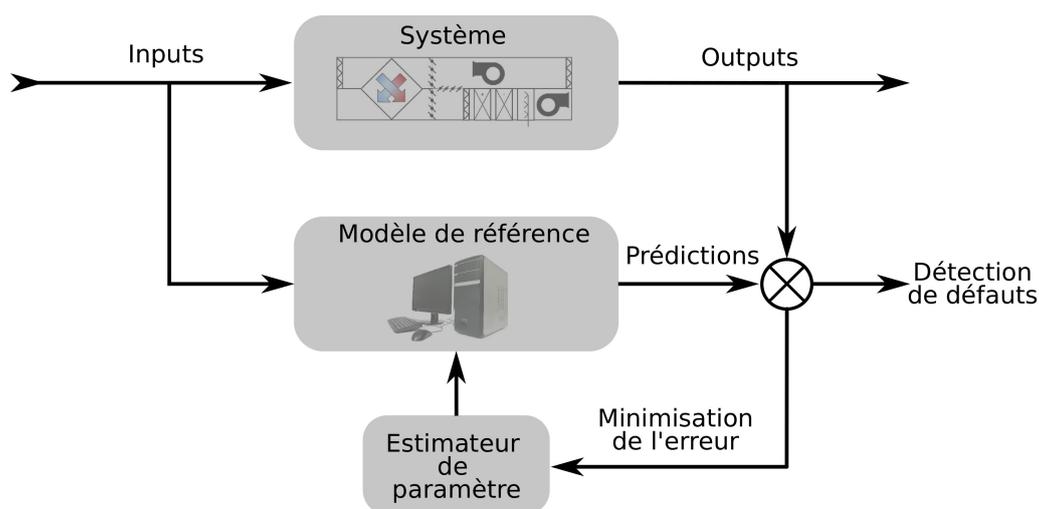


Figure 1.12 – Méthode de l'estimation de paramètres.

Afin d'effectuer ces analyses sur les données issues de mesures il faut effectuer une comparaison par rapport à un modèle référence permettant de connaître les conditions de fonctionnement théorique de ce système dans un environnement identique. Les principaux modèles généralement utilisés pour simuler les performances théoriques des systèmes sont (i) les modèles physiques, (ii) les modèles semi-empiriques ou hybrides et (iii) les modèles empiriques. Les modèles physiques (i), aussi appelés analytiques, de premier principe, ou *white box* sont des modèles mathématiques, décrivant les phénomènes physiques en jeu via des équations théoriques ou expérimentales. Ils ont l'avantage d'être compréhensibles et très précis, mais nécessitent de l'expertise de par leur complexité. Ils induisent des calculs relativement lourds et donc de forts coûts en CPU, ce qui rend ces modèles compliqués à utiliser pour du calcul en temps réel. Les modèles semi-empiriques ou hybrides (ii) *grey box* ont été développés pour répondre aux problématiques des temps de calcul de modèles physiques. Ces modèles utilisent les paramètres physiques du système sur lesquels des techniques de régression ont été appliquées pour correspondre aux conditions de régimes perma-

nents. Les modèles empiriques (iii), ou *black box* expriment les comportements observés à travers des équations mathématiques, mais n'ayant cette fois aucune signification physique. Des exemples de ces types de modèles sont ARX (Auto-Regressive eXogenous) ou ARMAX (Auto-Regressive Moving Average eXogenous).

Pour chacun de ces types de modèle une *calibration* doit être effectuée. En effet, les paramètres d'entrée du modèle n'étant pas connus avec certitude, ils peuvent engendrer des situations de référence fausses. C'est pourquoi on dit que les modèles doivent être *entraînés*, les processus de prétraitement et de classification doivent *apprendre* les fautes types. Cet *enseignement* peut être effectué via des expériences (e.g. test en chambre ou in situ), ou d'après les remontées d'information d'un système fiable (i.e. ayant subi un Cx ou un travail d'analyse rigoureux).

La FDD avec les méthodes basées sur l'analyse peut donc être appliquée de deux façons soit sur les sorties, soit sur les entrées. Si elles sont effectuées sur les sorties, où ces dernières seront comparées entre le modèle et la mesure, elles fournissent une méthode robuste pour un nombre limité de diagnostics simples. Si elles sont réalisées sur les entrées, en comparant les sorties (prévision et mesure) puis en cherchant à ajuster les prévisions du modèle en modifiant ses paramètres, alors les diagnostics sont très pertinents. En revanche pour cette configuration un compromis doit être fait entre nombre de paramètres ajustables, temps de calculs et représentativité.

#### *Les méthodes basées sur l'expertise*

Dans les cas de systèmes tellement complexes que les simulations ou les coûts en temps de calcul ne seraient pas acceptables, il est possible de mettre en place des méthodes basées sur le savoir pour détecter l'apparition de défauts et les diagnostiquer. Ces méthodes se basent essentiellement sur des modèles dit qualitatifs issus de *savoirs experts* transcrits en *règles* de bon fonctionnement du système. Cela sous-entend que le fonctionnement du système, les liens entre les différents défauts et leurs causes sont un savoir a priori. Cette méthode de diagnostic induit donc trois étapes qui sont l'acquisition de la connaissance par l'expert, l'expression de cette connaissance à travers une structure et la méthode de raisonnement permettant de fournir un diagnostic [81]. Les principales méthodes basées sur la connaissance sont l'analyse causale, le système expert et l'identification de tendances (*pattern*).

**L'analyse causale.** Cette méthode utilise le *signed directes graph* (aussi connu sous l'acronyme SGV) comme modèle quantitatif du système étudié pour en faire un outil de diagnostic de défauts en temps réel [155]. Le système est alors représenté comme une série de nœuds et de connexions encadrés par des valeurs limites. En fonction de l'état de la variable (nœud), un symbole est attribué au nœud (0 = normal, + = au-dessus de la limite, - = au-dessous de la limite). Les états et relations entre les nœuds sont alors utilisés pour déterminer les défauts. La Figure 1.13 présente le principe de la méthode SGV.

Cette méthode à l'avantage d'être plus légère à mettre en place que les séries de règle *si-alors* et donc moins coûteuse en temps d'ingénierie, rendant l'implémentation de méthodes de diagnostic plus accessible.

**Le système expert.** Cette approche basée sur des règles logiques est issue de la connaissance des liens entre les défauts d'un système et leurs causalités. Cette approche a été décomposée en trois niveaux de complexité [182]. Le premier correspond au savoir expert de surface servant à élaborer les règles logiques. Le second est celui du savoir expert profond permettant de relier les règles logiques au bon fonctionnement du système et aux règles du 1<sup>er</sup> principe pour créer les inférences. Le dernier niveau se rapporte aux méthodes d'apprentissage. Les deux premiers niveaux sont étroitement liés et peuvent être mis en place par (i) des règles *IF-THEN*, (ii) des

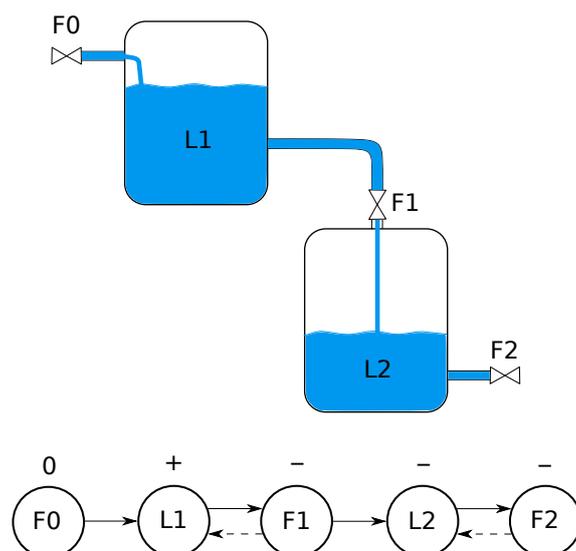


Figure 1.13 – Exemple d'un système de cuves et son SGV.

arbres de défaillance, (ii) des tables de décision, (vi) des réseaux sémantiques. Les règles *IF-THEN* (i) ou *SI-ALORS* en français, associent à la conjonction IF un type de réponse (mesure), et lui attribue une cause déterminée exprimée par le THEN. Cette approche est intéressante du fait qu'elle soit compréhensible, car descriptive, mais peut devenir compliquée avec le nombre de règles. Les arbres de défaillance (ii), où à chaque nœud d'une structure en arbre se trouvent des questions, les réponses aux questions mènent alors le cheminement dans la ramification. Dans ce type de structure les feuilles de l'arbre sont les causes des défauts. Dans cette représentation les combinaisons de défauts sont difficiles à représenter. Les tables de décision (iii) sont des matrices en deux dimensions dans lesquelles les défauts sont liés aux symptômes. Les réseaux sémantiques (iv), est un type de méthode qui se différencie des autres méthodes de règle conditionnelle car il lie un symptôme à tous ses défauts possibles. L'apparition de plusieurs symptômes peut donc aiguïser le diagnostic, mais il est compliqué de créer des réseaux sémantiques complets.

Les informations relatives à la méthode de FDD basée sur le système expert peuvent être exprimées de façon qualitative, c'est-à-dire vis-à-vis de valeurs estimées (e.g. bon état), non chiffrées (e.g. liquide ou vapeur) ou dépendantes d'une référence (e.g. supérieur à) [81]. Ce type de méthode a été testé et conduit à des outils automatisés efficaces étant en mesure de contrôler les systèmes. Elles peuvent être directement incorporées dans les systèmes de contrôle des équipements [152, 153].

Le savoir expert est donc utilisé dans le cadre de la FDD à travers un processus de raisonnement ou d'inférence. Ces raisonnements nécessitent une connaissance a priori des systèmes et du fonctionnement du bâtiment afin de pouvoir créer les règles d'inférences. Il existe principalement deux méthodes l'approche dite *Top down* et l'approche *Bottom up*. Dans l'approche *Top down* aussi connue sous le nom d'inférence directe, un défaut est identifié à partir d'une dérive se manifestant au niveau du bâtiment comme une dérive d'ambiance ou de consommation. La tâche est alors d'identifier le système fautif, puis d'isoler le défaut (localisation). L'identification peut être faite par probabilité ou via des pondérations, et l'isolement du défaut par une arborescence hiérarchique. Dans le cas de règles à plusieurs étages, la conclusion ne peut être uniquement donnée qu'après que des réponses aient été données à toutes les règles. L'approche *bottom up*, cherche à prédire comment un type de défaut d'un composant peut se manifester à l'échelle du bâtiment. Cette approche partant de constats faits sur les composants remonte aux systèmes puis au bâtiment grâce à la connaissance liant les défauts à leurs conséquences à travers les réponses à plusieurs questions. Cette méthode nécessite de déterminer les composants les plus influents et sensibles aux défauts en amont car l'instrumentation de tous les composants n'est pas possible.

Le troisième niveau du système expert énoncé préalablement est une réponse au fait qu'en pratique l'élaboration du savoir peut-être compliquée à effectuer. C'est pourquoi l'utilisation de *machine learning* peut intervenir. Afin de parer le manque de données, d'informations etc, les outils de *machine learning* sont en mesure d'extraire de l'information et du savoir dans les données réelles d'après des théories statistiques.

**L'identification de tendance.** Ces méthodes permettent de mettre en évidence des corrélations non linéaires entre des structures d'un jeu de données et des défauts identifiés par un expert. Néanmoins le défaut majeur de ce type d'approche est qu'elle demande une quantité de données conséquente et précise pour pouvoir espérer fournir des tendances fiables. Parmi ces méthodes il existe les classificateurs Bayésiens (*Bayes Classifier*), les classificateurs du plus proche voisin (*K-Nearest neighbor*), les réseaux de neurones artificiels (ANN ou *Artificial Neural Networks*) [76], la logique floue, et les classificateurs de Support vector machine [118].

### *Les méthodes basées sur le traitement de données*

Les méthodes basées sur le traitement des données mesurées seront directement appelées basées sur les données. Ces dernières, comme les méthodes basées sur la connaissance utilisant l'identification de tendances, exploitent de grands jeux de données pour créer des relations entre des tendances dans les données et des défauts. Toutefois, la principale différence est que ces méthodes utilisent la réduction dimensionnelle, c'est-à-dire que via des méthodes des statistiques multivariées, ces outils sont en mesure de réduire des données de haute dimension en des données de dimension inférieure plus accessibles et intéressantes au regard de l'étude. Deux principales méthodes basées sur la donnée peuvent être citées dans le cadre de la FDD des systèmes du bâtiment, celle basée sur le traitement du signal, et l'approche basée les statistiques multi-variables.

**L'approche basée sur le traitement du signal.** Cette approche de la FDD s'appuie sur l'analyse des données de sortie du système et plus précisément l'analyse du bruit dans les mesures [181]. Elle ne nécessite donc pas la présence d'un modèle physique ou mathématique explicite pour la détection. Cette méthode est basée sur le fait qu'un défaut courant dans un système induira forcément une déviation d'un des paramètres du système de sa valeur nominale se traduisant par une variation dans les sorties du système [31]. Et donc des corrélations peuvent être faites entre des variations des sorties du système, s'éloignant d'un comportement périodique représentatif d'un fonctionnement nominal et certains défauts. Ces méthodes de FDD sont plutôt simples à implémenter mais possèdent une capacité limitée à déterminer les défauts complexes.

**L'approche basée sur les statistiques multi-variables.** La FDD basée sur la statistique multi-variable a pour objectif de représenter l'état d'un système comportant un grand nombre de données en un jeu de données de dimension inférieure grâce à des techniques de réduction de dimension. Parmi ces méthodes, la plus couramment utilisée est l'analyse en composante principale (PCA pour *Principal Component Analysis*) [9, 176, 177]. Ces méthodes sont beaucoup plus efficaces dans la détection de défauts que dans le diagnostic de par leur fonctionnement. Les données sont traitées pour réduire leur dimensionnalité et les exprimer selon un nombre de dimensions inférieures mais conservant au mieux les tendances du jeu initial. Ces méthodes permettent donc de visualiser plus simplement l'apparition de défauts, sans toutefois les relier à une cause. Pour pallier à cette problématique l'utilisation d'autres méthodes sont couplées à l'analyse de statistiques multivariées afin de pouvoir lier des causes aux effets comme les méthodes du discriminant de FISHER (FDA), la méthode des moindres carrées (PLS) ou l'analyse canonique des corrélations

(CVA)

L'intégralité des techniques de FDD peut aussi être décomposée en deux grandes parties qui sont les méthodes basées sur les modèles et les méthodes sans modèle [93]. Les méthodes sans modèle comme nous venons de le voir ne détectent pas les problèmes apparaissant sur un système grâce à une modélisation via des équations mathématiques de ce dernier, mais en analysant directement les données elles-mêmes. Dans ce cas, les méthodes de contrôle par redondance étant des méthodes de détection de défauts non basées sur des modèles et comparant des données de mesure, peuvent être considérées comme faisant parties des méthodes de FDD basées sur les données. Le contrôle par redondance consiste simplement en des mesures simultanées de la même variable physique et permet de mettre en évidence un capteur défectueux ou une dérive [135].

*Les combinaisons de méthodes.*

Pour qu'un outil de FDD fonctionne de façon optimale, il devrait posséder chacune des dix caractéristiques suivantes [172] : rapidité de détection des défauts et diagnostic, isolabilité des défauts, robustesse, identification de nouveaux défauts, estimation de l'erreur de classification, adaptabilité, explication du défaut, répondre aux exigences de modélisation (simple), répondre aux exigences de stockage et de calcul (peu complexe avec bonne capacité de stockage), identification des défauts combinés. Dans la pratique, les différentes méthodes ne répondent jamais complètement à l'intégralité des critères et le choix de la méthode doit donc s'effectuer en fonction des besoins et nécessités du projet. Afin de pallier aux différents problèmes intrinsèques à chacune de ces méthodes, des combinaisons de plusieurs d'entre elles ont fait leur apparition pour permettre de proposer des diagnostics plus précis et plus fiables. Ainsi chacune des méthodes citées précédemment (basées sur l'analyse, la connaissance ou les données) peut être combinée à une autre ou à toutes les autres en même temps. Ces méthodes hybrides permettent également de réduire le nombre de lacunes relatif aux dix critères nécessaires à une FDD idéale. Des études présentent quelques-unes de ces combinaisons et comparent leurs apports par rapport aux méthodes seules [182].

### 1.3 Problématique

Les défauts apparaissant dans les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation peuvent représenter une part non négligeable des consommations des bâtiments (jusqu'à 30 % dans certain cas) [93]. C'est pourquoi des méthodes comme le commissionnement des bâtiments et la détection de défauts ont fait leur apparition. Ces méthodes, s'avèrent particulièrement efficaces que ce soit pour réduire les consommations des bâtiments, pour maintenir une bonne qualité des environnements intérieurs ou pour améliorer la durée de vie des systèmes [95, 148].

Néanmoins, malgré ce pouvoir de réduction des consommations d'énergie, les méthodes de FDD peinent à se propager et à être mises en place [94]. Très peu d'outils de détection de défauts sont utilisés dans des installations réelles. Plusieurs freins à la mise en place de ces outils ont été relevés dans la littérature. Tout d'abord, il semble qu'il y ait un manque de demande de la part des Maîtres d'ouvrage et des services techniques. Il est compliqué d'apprécier les différences de performance des méthodes de FDD dans la mesure où ces dernières sont rarement comparées. Leurs performances sont souvent évaluées de façon indépendante par les concepteurs des méthodes. Cette pratique permet d'estimer l'efficacité d'une méthode sur un cas mais pas de la comparer aux autres [15, 94]. Cela peut induire un problème quant au choix de la méthode de FDD à utiliser

pour un maître d'ouvrage. De plus, les méthodes de détection de défauts souffrent parfois d'idées reçues. L'impression que ces méthodes coûtent plus à mettre en place qu'elles ne rapportent une fois implémentées, est courante dans le secteur commercial [59,95]. C'est pourquoi, les avantages économiques doivent être validés et mis en évidence [15]. En revanche, cette vision se focalise uniquement sur les gains économiques générés par ces méthodes à court terme. Elle néglige complètement les avantages en terme de confort pour les occupants, d'amélioration de la qualité de la maintenance et du pilotage ainsi que des gains en terme de durée de vie des équipements [95,148]. Ces avantages aussi doivent être mis en avant car, bien que leur estimation en terme de retombée économique soit difficilement réalisable, ils induisent par ailleurs des économies.

Il est également souvent relevé que les méthodes de détection de défauts sont trop spécialisées ou spécifiques. Ceci est un handicap car ces méthodes ne sont alors utilisables que sur un type de système ou de configuration. Elles sont alors peu diffusables ou nécessitent des modifications sur le système ou son instrumentation. Les méthodes génériques, pouvant être utilisées sur plusieurs systèmes ou configuration sont encore rares [15,94]. Leur développement est nécessaire afin de permettre de s'adapter au système existant. Ainsi ces méthodes permettraient de résoudre les problèmes d'implantation ou de manque de capteurs. De plus ces derniers augmentent significativement les coûts de mise en place des outils de FDD et leur temps de retours sur investissement. Mais cette spécialisation ne s'applique pas qu'aux systèmes et à leur configuration mais également aux bâtiments. Les méthodes s'appliquent majoritairement (pour ne pas dire essentiellement) aux grands bâtiments tertiaires (commerciaux) existants. Il y a un manque concernant les méthodes pouvant être utilisées sur des bâtiments de plus petite taille [59] bien que le marché soit considérable. Les outils de FDD sont également souvent spécifiques aux cas de commissionnement des bâtiments existants. Ils peinent donc à être utilisés dans le contexte de bâtiments neufs ou dans les cas de commissionnement initial dans lesquels les besoins d'informations sont différents [15].

Pour finir, un problème souvent mis en évidence dans la littérature concerne l'adéquation des outils avec leurs utilisateurs [40]. Parmi les méthodes de FDD, certaines nécessitent que plusieurs étapes soient réalisées *manuellement* par des opérateurs alors que d'autres sont complètement automatisées. Les méthodes de détection de défauts automatisées sont appelées AFDD pour *Automated Fault Detection and Diagnosis*. Le manque d'automatisme des méthodes de FDD est un frein à l'utilisation de ces outils car il implique un travail supplémentaire de la part des équipes techniques. Les équipes de maintenance et d'exploitation ne possèdent souvent pas ce temps nécessaire pour l'utilisation correctes de ces méthodes [148]. De plus, les méthodes nécessitent souvent des compétences et qualifications spécifiques dont les équipes de maintenance ne bénéficient pas [119,173]. Afin de pallier à ces problématiques, les outils de FDD devraient être plus automatisés et orientés vers l'utilisateur. Ces outils doivent fournir une information simple, claire et concise pour éviter qu'elle ne soit manquée et qu'elle soit rapidement comprise [173]. Ainsi, les temps d'utilisation alloués seraient minimisés comme les connaissances nécessaires à leur fonctionnement. Ces méthodes sont d'autant plus attractives qu'elles permettent de diminuer l'implication du personnel technique et donc de réduire les coûts.

Ce travail de thèse a donc pour objectif de répondre aux problématiques présentées précédemment. C'est pourquoi une solution devra être apportée pour permettre d'estimer et de comparer les performances de différents outils pour simplifier le choix des maîtres d'œuvre. La méthode qui sera développée devra pouvoir être diffusable en proposant une solution générique étant indépendante du système et adaptable à toutes ses configurations c'est à dire aux équipements et composants mis en place. Elle devra être adaptée aux différentes échelles et typologies de bâtiment pour ne pas être mise en place seulement sur les grands bâtiments commerciaux. Cette méthode devra également pouvoir fournir des résultats en temps réel sans demander d'action de la part du personnel, ni aucune analyse complexe des données grâce à une information simplement

compréhensible sur le fonctionnement du système pour limiter les besoins de qualification des opérateurs. Pour y parvenir, ces travaux sont développés en cinq étapes. Dans le Chapitre 2, un jeu de données expérimentales d'un système comportant des fonctionnements nominaux et avec défauts est généré. Actuellement la littérature ne dispose pas de ce type de données d'une grande fiabilité, avec lesquelles les méthodes de FDD pourront être évaluées de façon objective. Dans un deuxième temps, une méthode de détection de défaut sera proposée dans le Chapitre 3. Son fonctionnement ainsi que son implémentation dans des opérations de commissionnement sera détaillée. Ensuite, l'efficacité de cette méthode est testée dans le contexte d'une implémentation en commissionnement initial, soit sur un bâtiment neuf. Pour rester fidèle aux problématiques de ce contexte, la méthode est développée sur la base d'un apprentissage à partir de données numériques puis validée avec les données expérimentales obtenues au Chapitre 2. Pour finir, l'outil est testé dans un cas de commissionnement de bâtiments existants avec des données réelles. Ainsi, il sera vérifié l'adéquation de la méthode développée par rapport aux objectifs fixés



# 2

## Vers un référentiel expérimental pour la comparaison des défauts

---

---

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>31</b>
<b>2.2</b>	<b>Définition des défauts</b>	<b>31</b>
2.2.1	Les défauts habituellement étudiés	31
2.2.2	L'émergence de nouveaux type de défauts	31
2.2.3	La mise en évidence des défauts	32
<b>2.3</b>	<b>La mise en place d'un référentiel de comparaison</b>	<b>33</b>
2.3.1	La nécessité d'un référentiel	33
2.3.2	La Méthodologie de comparaison des outils de FDD	34
2.3.3	Les données d'entrée	35
2.3.4	Le cahier des charges du référentiel	37
<b>2.4</b>	<b>Élaboration d'un référentiel</b>	<b>38</b>
2.4.1	Le cadre	38
2.4.2	Matériel et Méthode	39
<b>2.5</b>	<b>Les résultats</b>	<b>50</b>
2.5.1	Les défauts globaux	50
2.5.2	Les données d'été	57
2.5.3	Les données d'hiver	61
<b>2.6</b>	<b>Discussions</b>	<b>67</b>
<b>2.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>69</b>
2.7.1	Synthèse du travail effectué	69
2.7.2	Utilité de ces données	71
2.7.3	Vers une ébauche de référentiel	71

---

## 2.1 Introduction

Il est indispensable de pouvoir comparer les outils et méthodes de détection de défauts. Chacun d'eux possède des qualités et caractéristiques différentes, rendant leur utilisation plus ou moins intéressante et efficace en fonction des cas ou des systèmes. Pour évaluer les capacités d'outils de détection de défauts, des données de fonctionnement de systèmes sont nécessaires. Afin que des évaluations d'outils de FDD soient comparables, ces dernières doivent être réalisées sur des données objectives, identiques, précises et représentatives. Ainsi les résultats obtenus par les différents outils sur ces données pourront être opposés pour estimer lesquels possèdent les caractéristiques les plus enviables. Grâce à ces résultats il sera plus simple de déterminer l'adéquation d'un outil à une situation ou un système.

Néanmoins ce type de données fait actuellement défaut dans la littérature. C'est pourquoi dans ce Chapitre, un jeu de données expérimentales d'un système de bâtiment de type centrale de traitement de l'air est généré. Ces données comportent des fonctionnements nominaux et défectueux du système, permettant ainsi l'appréciation de l'apparition de ces derniers. L'objectif est d'obtenir un jeu de données possédant une grande fiabilité afin de pouvoir être utilisé pour développer et entraîner les outils de détection de défauts.

## 2.2 Définition des défauts

### 2.2.1 Les défauts habituellement étudiés

Les outils de FDD s'attachent habituellement à détecter deux principaux types de défaut, les "Hard Fault" et les "Soft Fault". Les *hard faults* sont des défauts qui apparaissent de manière soudaine et induisent donc généralement un défaut complet du système. Ce type de défaut est habituellement assez bien mis en évidence par les méthodes de FDD classiques, de par leur conséquence grave sur l'état du système. En effet, les *hard faults* entraînent en générale des modifications importantes et donc visibles dans le fonctionnement du système. En revanche, ce type de défaut bien qu'il soit relativement facile à détecter, est plutôt complexe à anticiper. Les *hard faults* correspondent par exemple à des pannes des éléments électroniques, des composants (pompes, ventilateurs ...) ou à des blocages mécaniques, des ruptures de courroies.

Les *soft faults* correspondent à des défauts, qui apparaissent graduellement de façon continue. Ces défauts décalent le fonctionnement du système d'un état optimal ou nominal vers un fonctionnement non-optimal voir non souhaité. Habituellement les *soft faults* n'entraînent pas d'arrêt du système. Ces défauts sont même souvent liés à l'utilisation du système dans des conditions normales. Leur caractère progressif et habituel les rend plus complexes à mettre en évidence, il peut même être difficile de différencier leur impact usuel de leurs conséquences nocives. Leur détection, qui nécessite de connaître les valeurs seuils, permet une intervention de l'exploitation et de la maintenance. Ainsi, le fonctionnement souhaité (nominal) peut être conservé et toutes conséquences néfastes d'ordre sanitaire, de confort, voir même l'apparition de *hard faults* peut être évité. Des exemples de *soft faults* régulièrement rencontrés dans le domaine du CVC sont l'encrassement de filtres, l'embouement d'échangeurs, ou encore les dérives de capteurs.

### 2.2.2 L'émergence de nouveaux type de défauts

Aujourd'hui, la majorité des recherches scientifiques et technologiques se concentre majoritairement sur ces deux types de défaut. Néanmoins, les *hard* et *soft faults* ne sont pas les seuls défauts

pouvant être rencontrés sur les bâtiments et leurs équipements. De nombreux comportements des bâtiments ou de leurs systèmes doivent être considérés comme défaillants et pris en compte par les algorithmes de FDD. En effet, il existe également des défauts des équipements liés à des comportements non optimaux du système au regard de l'analyse fonctionnelle du système. Ces fautes sont liées à des problèmes de régulation, de contrôle du système ou de ses équipements. Cela signifie donc que le comportement du système n'a pas été conçu (création de l'analyse fonctionnelle), ou mis en place, de façon optimale. Ces nouveaux types de défauts sont appelés défauts de régulation. Ils trouvent tout leur sens dans le contexte actuel de recherche d'économie d'énergie au travers du fonctionnement optimal des appareils. Ces défauts apparaissent donc plutôt lors de transition dans le fonctionnement du système, mais également lors d'évolution du besoin du bâtiment.

Nous avons choisi de séparer ces fautes des *soft faults* et de créer de nouvelles catégories, car elles diffèrent fondamentalement de ces dernières. En effet, bien qu'elles induisent également un fonctionnement non-optimal du système, elles ne sont pas dues au fonctionnement normal du système. Les *soft faults* sont des dégradations du fonctionnement et des performances des équipements résultant de l'utilisation normale. Comme par exemple, le colmatage d'un filtre, du à sa fonction continue de filtrer certaines particules, ou la dérive d'un capteur suite à de longues durées d'utilisation. En revanche, les défauts de régulation sont la conséquence d'une mauvaise configuration du travail d'ingénierie.

De même, les fonctionnements des systèmes ne répondant pas aux attentes du maître d'ouvrage, doivent être pris en compte. Ces défauts d'inadéquation aux objectifs peuvent être de plusieurs natures. Par exemple, ils peuvent être de caractère énergétique, avec des objectifs de consommation dans le cadre de CPE, ou relever de notions telles que le confort hygrothermique, avec des objectifs précis de consignes en température et humidité. Ces défauts, bien que déjà existants, sont rarement traités dans la littérature. C'est pourquoi ils doivent être tout d'abord référencés, afin d'être recherchés puis à terme détectés et diagnostiqués.

Pour conclure, il semble indispensable de préciser les définitions actuelles des défauts rencontrés dans le domaine du Génie Climatique. Nous proposons d'ajouter deux nouveaux types de défauts actuellement rencontrés qui sont ceux de régulation (ou *control faults*) et d'inadéquation aux objectifs du MOA. Il paraît également important de préciser que bien que la communauté scientifique ait délaissé ces types de défauts, le monde de l'industrie leur porte attention et dispose donc de méthodes pour les diagnostiquer.

### 2.2.3 La mise en évidence des défauts

Les catégories de défaut ayant été précisées, nous allons désormais expliciter les façons de mettre en évidence les défauts. La littérature, comme les outils de détection industriels, définissent les défauts selon trois grandes catégories : celles basées sur l'état du système (*Conditioned-Based*), celles basées sur le comportement (*Behavior-Based*) et celles basées sur les résultats (*Outcome-Based*) [60]. Bien qu'elles ne soient pas forcément toujours explicitées ces méthodes sont mises en œuvre dans différents domaines utilisant déjà la détection de défauts comme l'aérospatiale ou le contrôle de procédés industriels [170–172, 179].

Lorsqu'un défaut est défini selon l'état (*Conditioned-Based*) cela signifie que le système ou un de ses équipements se trouve dans un état indésirable, par exemple un actionneur défectueux [18]. Ainsi la présence ou non de conditions induisant un fonctionnement défectueux, n'interfère pas avec la présence ou non du défaut.

La définition des défauts basée sur le comportement (*Behavior-Based*) s'appuie sur les actions du système, par exemple lorsque ce dernier fournit du chauffage et du refroidissement simultanément. Dans ce cas, contrairement aux défauts basés sur les conditions, le défaut ne peut être mis en évidence uniquement en cas de présence de conditions induisant le fonctionnement défectueux.

Lorsque la définition d'un défaut est basée sur le résultat (*Outcome-Based*), cela signifie que la présence d'un défaut dépend de la valeur d'un indicateur quantifiable (e.g. une consommation ou une efficacité). Ainsi un défaut est détecté lorsque la valeur de la grandeur calculée s'écarte de la valeur attendue. La définition des défauts basée sur le résultat s'approche de celle basée sur le comportement mais inclut la présence d'une valeur de référence.

Ces trois moyens de mise en évidence des défauts sont présentés dans la Figure 2.1 avec un cas trivial. L'exemple est réalisé sur un schéma mono-filaire d'un interrupteur endommagé pour allumer une ampoule. Dans le premier cas, il est remarqué que l'interrupteur est cassé, cela correspond à une mise en évidence selon l'état. Dans le second cas l'interrupteur est actionné mais l'ampoule ne s'allume pas, cela correspond à une détection selon comportement. Dans le dernier cas, l'interrupteur est actionné et aucune augmentation de l'éclairage n'est mesurée avec un luxmètre, cela correspond à une mise en évidence selon les résultats.

Il est évident que chacune de ces définitions de défaut comporte des avantages et des inconvénients mais chaque moyen de définir les fautes ne permet pas la mise en évidence de tous les types de défauts. Par exemple, les défauts définis par l'état peuvent être détectés avant qu'ils n'induisent de conséquences mais s'appliquent surtout sur des *hard faults*. Alors que les défauts définis par les sorties peuvent détecter des dérives des équipements, mais doivent attendre leur apparition pour être détectés.

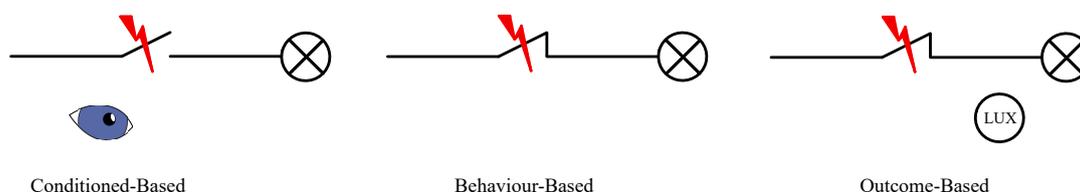


Figure 2.1 – Illustration de la mise en évidence des défauts.

## 2.3 La mise en place d'un référentiel de comparaison

### 2.3.1 La nécessité d'un référentiel

Maintenant que des précisions ont été apportées quant aux types de défauts rencontrés dans le secteur du bâtiment, notre attention va se porter sur l'efficacité des outils de détection de défauts.

Récemment, la DPEB [86] a imposé en Europe la mise en place de systèmes de régulation (GTB) dans tous les bâtiments non résidentiels possédant des systèmes (chauffage, ventilation) d'une puissance supérieure à 290 kW, lorsque cela est économiquement viable, d'ici 2025. Ce texte est adapté pour la France par le Décret Tertiaire et sera sûrement intégré dans les prochaines réglementations [87]. Cette mesure sera sans aucun doute très bénéfique pour les économies d'énergie dans le secteur du bâtiment. Cependant, aucune obligation de contrôle du bon fonctionnement de ces outils n'est prévue par la directive. En effet, il est souvent constaté que, même s'ils sont relativement efficaces, ces outils de contrôle et de suivi souffrent eux même de mauvaises mise en œuvre ou utilisation. Ces défauts (e.g. problèmes de programmation, équipements et consignes mal configurés, mauvais emplacement de capteurs ou d'actionneurs...) réduisent considérablement l'efficacité des GTB [104]. Une partie de ce problème peut être résolue avec la mise en place d'outils de détection de défaut. Couplés aux systèmes de GTB, les outils de FDD peuvent aider à la mise en évidence des problèmes des systèmes mais également des problèmes du dispositif de suivi lui-même.

Malgré ces avantages, l'implémentation des outils de FDD n'est pas courante. En effet, il existe

aujourd'hui un grand nombre de méthodes et d'outils de FDD, développés à des fins de recherches ou industrielles. Mais KATIPAMULA *et al.* constatent que peu de ces outils sont mis en place ou utilisés en pratique [94, 96]. Plusieurs freins à l'utilisation de ces outils très utiles ont déjà été mis en évidence dans la littérature. Les outils de détection de défauts subissent par exemple l'influence de barrières technologiques, économiques et de marchés [59]. Parmi les barrières technologiques il en existe des intrinsèques aux outils de FDD. Par exemple le fait que ces outils soient trop spécifiques à un système (et donc peinent à trouver nombre d'applications), ou encore qu'ils ne soient pas entièrement automatisés [94].

Il existe également des freins technologiques dépendant de la situation, comme l'inexistence de système de GTB ou le manque de capteurs mis en place (ce qui augmente le ratio coût bénéfice) [148]. Ces barrières tendent à disparaître ou à se faire moins importantes avec l'arrivée des objectifs de la DPEB. Le frein économique majeur à leur développement provient de leur coût (investissement et fonctionnement) même si des études ont montré que ce coût était souvent surestimé et que l'utilisation de ces outils permettait des économies d'énergie importantes. Parmi les freins inhérents aux marchés on retrouve par exemple l'inadéquation des outils à un type de système ou l'incertitude concernant les performances. Il est compréhensible qu'il soit complexe pour les MOA de choisir un outil ou une méthode de FDD parmi l'offre du marché. En effet, il est difficile d'identifier clairement l'adéquation des outils proposés par rapport aux systèmes installés et de s'assurer de l'efficacité des outils.

C'est pourquoi DASH et VENKATASUBRAMANIAN ont effectué un travail de recherche sur les critères souhaités d'une méthode de FDD [32]. Ces travaux ont abouti à une liste comportant dix critères recherchés qui sont : La détection et le diagnostic rapide, l'isolabilité, la robustesse, l'identification de nouveauté, l'identification de défauts multiples, l'explication, l'adaptabilité, des besoins raisonnables en terme de stockage et de calcul informatique.

Bien que les caractéristiques théoriques enviables des méthodes de FDD soient aujourd'hui connues, leur évaluation n'est pas toujours effectuée. Lorsqu'elle est faite, c'est par ses concepteurs sur un cas spécifique. Le fait que chaque méthode soit testée sur des cas différents, induit qu'il est souvent très compliqué, voir impossible, de comparer les performances des méthodes entre elles.

### 2.3.2 La Méthodologie de comparaison des outils de FDD

Ce manque de rigueur concernant l'estimation des performances des outils de FDD a été mis en évidence dans un travail récemment publié par [60]. Dans cette étude une méthodologie permettant de comparer les méthodes de détection de défauts a été développée. Elle s'inspire et complète des travaux antérieurs menés par [183]. Ce processus présenté dans la Figure 2.2, se compose de six étapes permettant l'évaluation partielle des performances des outils.

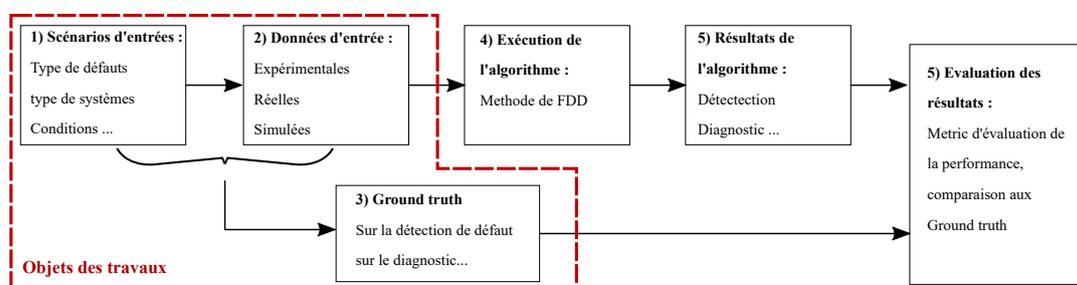


Figure 2.2 – Méthodologie de comparaison des outils de FDD inspiré par [60].

La première étape de cette méthodologie, appelée les scénarios d'entrée, consiste en la définition du cadre de l'étude. Dans cette étape, il est nécessaire d'explicitier les informations permettant de comprendre le cas étudié. C'est à dire comment fonctionne le système, comment est son envi-

ronnement, les types de défauts, leur intensité vis à vis de grandeurs mesurables ...

La seconde étape concerne la génération d'un jeu de données ou échantillon d'entrée servant à la mise en évidence des performances de l'outil de FDD. Ce jeu de données doit être généré afin de respecter les scénarii sélectionnés lors de l'étape précédente. Ils sont composés des informations sur l'état du système sous forme de séries temporelles. Ils peuvent donc inclure des données relevées par des capteurs ou l'état de contacteurs présents sur le système, qui sont récupérés du dispositif de suivi ou de contrôle du bâtiment. Ces données peuvent également être issues de modèles numériques, en cas d'absence de données réelles. L'objectif de ces échantillons sera la génération du résultat (détections et diagnostics) qui permettra l'évaluation de la performance de la méthode de détection de défauts.

La troisième étape se réalise en parallèle des deux premières. Elle concerne l'établissement de ce qui est appelé le *Ground Truth* soit la vérité fondamentale. Cette étape est indispensable pour l'évaluation de la qualité des détections et du diagnostic. Elle permet de mettre en évidence l'apparition des défauts. L'objectif de cette phase est de définir pour chacun des échantillons les périodes où le système est en situation de défaut ou en fonctionnement nominal. Lorsque le système présente un état de défaut, il faudra mettre en évidence la cause de ce problème. Ainsi le défaut sera unanimement accepté et la raison de son apparition pourra être diagnostiquée précisément. Bien sûr, la confiance de base devra être fournie pour chacun des échantillons générés à la seconde étape.

La quatrième phase du processus est l'application des méthodes ou outils de FDD sur les différents jeux de données. Lors de cette étape, les méthodes de détection de défauts vont lire et traiter les données d'entrée et certaines méta-data afin de pouvoir fournir un diagnostic sur le jeu traité. Cette étape du processus de comparaison des performances peut inclure de nombreuses étapes de traitement et d'analyse de la part des outils testés.

L'étape cinq est la sortie de l'algorithme de détection de défauts. Pour chacun des jeux de données, l'outil fournit un résultat indiquant s'il y a eu la détection d'un défaut ou si le fonctionnement est nominal. En présence d'un fonctionnement défectueux, la méthode doit donner un diagnostic sur la cause du défaut.

La sixième et dernière étape de la méthodologie correspond à l'évaluation des résultats de la méthode de FDD. Durant cette phase, les résultats des algorithmes pour chacune des données d'entrée seront analysés et comparés au regard du *ground truth*. Ainsi la qualité des détections et des diagnostics pourra être évaluée. Des résultats pourront ensuite être traités afin de fournir des indicateurs de mesure de la performance de la détection et du diagnostic.

On constate que cette méthodologie est assez précise pour permettre de cadrer les études de cas, tout en restant assez ouverte sur le contenu pour rester applicable et répliquable. Néanmoins, quelques interrogations subsistent, comme par exemple, le contenu des indicateurs de performance, ou le contenu des données d'entrée. Les conseils de bonne pratique indiquent seulement qu'il faudrait dans un souci de comparaison que les outils se basent sur les mêmes jeux de données. Bien que très riches, les travaux suivants ne sont pas assez exigeants sur le contenu des données d'entrée, qui sont finalement la fondation de la comparaison. Dans les sections suivantes, nous proposerons une définition et un cadre des données d'entrée à générer dans un but de comparaison objective des outils de FDD.

### 2.3.3 Les données d'entrée

Les jeux de données influent sur l'efficacité des outils de FDD. Par exemple, la qualité, la précision, le pas de temps, les incertitudes des valeurs d'entrée ont un impact sur la rapidité de détection et de diagnostic, la robustesse et l'estimation de la classification de l'erreur

De plus, les méthodes de FDD sont testées sur des types de données différents. Les méthodes sont appliquées soit sur des données d'entrée générées par simulation via des modèles numériques, soit sur des données réelles. Ces deux types de données ne possèdent pas les mêmes avantages.

Les données simulées sont les plus couramment utilisées pour générer des données de systèmes comportant des défauts [5, 97, 99, 100]. L'avantage principal est qu'en principe elles sont reproductibles. En effet, le caractère déterministe des modèles numériques permet de reproduire n'importe quelle simulation à partir du moment où les hypothèses de calcul sont identiques (le même moteur de calcul doit être utilisé), et que l'intégralité des entrées du modèle est connue (données météorologiques, maquette numérique du bâtiment, zonage thermique, hypothèses de construction ou des systèmes ...). En revanche, les modèles s'appuient pour la résolution des équations physiques, sur de nombreuses hypothèses. Or certaines d'entre elles ne permettent pas de modéliser correctement le comportement de tous les défauts, ce qui peut être problématique si elles ne sont pas connues du modélisateur. La complexité de la simulation énergétique dynamique (SED) réside dans le nombre important de paramètres d'entrée à renseigner. L'accès à des valeurs qualitatives de ces nombreux paramètres s'avère être une tâche complexe et fastidieuse. Cela induit donc dans les simulations autant d'erreurs possibles qu'il existe de paramètres influents incertains. Si on ajoute à cette grande possibilité d'erreurs sur les entrées dans les simulations le fait que l'interaction entre les paramètres fautifs soit non-linéaire, cela induit qu'il est presque impossible de les détecter. En effet, l'analyse du résultat d'une simulation permettra difficilement de mettre en évidence un problème de simulation et encore moins l'identification du paramètre fautif. Cela permet de se questionner sur la fidélité des modèles et leur capacité à représenter correctement les défauts. Enfin, les données ne sont peu ou pas représentatives des données réellement relevées par les systèmes de GTB. Les données simulées fournissent des valeurs des grandeurs physiques très précises (*i.e.* avec un grand nombre de chiffres significatifs), mais dont on ignore la fidélité. Ces données ne sont jamais entachées d'incertitude, ce qui ne permet pas d'estimer les faux positifs ou négatifs qui pourraient être détectés par les outils de FDD. Les modèles numériques permettent également de connaître les grandeurs physiques en tous points du bâtiment et des systèmes ce qui n'est pas réaliste.

Concernant les données réelles utilisées pour tester les outils de FDD, elles sont représentatives des données qui peuvent être obtenues par un relevé de points effectué par une GTB. Néanmoins, elles comportent également certains désavantages. Tout d'abord, au niveau de la reproductibilité des résultats, il est simplement impossible de reproduire ceux qui ont été obtenus. En effet, ces données étant issues de bâtiment en cours d'utilisation, elles sont le résultat de l'interaction entre la météo (localement inconnue), le bâtiment, ses systèmes mais également les occupants. Il n'y a donc aucun moyen de connaître l'intégralité de ces paramètres et donc de savoir précisément l'état de fonctionnement du bâtiment. Il n'y a finalement accès qu'aux valeurs des grandeurs données. Si un problème est détecté, aucun protocole rigoureux ne permet d'assurer qu'il est bien le résultat du défaut diagnostiqué. Là où les causes réelles ne sont pas toujours correctement identifiées ou connues et donc sans certitude de base quant à l'apparition du problème, tout diagnostic d'un outil de FDD ne serait que pure spéculation. Cela est donc problématique pour l'apprentissage des outils car les problèmes peuvent être dus à de nombreux paramètres qui ne sont pas connus et qui peuvent fausser le diagnostic. De plus, les données relevées sont rarement fournies avec leurs incertitudes, et les données calculées n'ont également pas subi de propagation d'incertitude. Ces problèmes induisent des questions quant à la qualité des données issues de bâtiments réels. Sans compter que de nombreux constats ont révélé des problèmes réguliers quant à l'implantation des capteurs in situ [104, 162].

Le manque de reproductibilité des cas de tests des méthodes, qu'ils soient générés numériquement ou issus de données réelles, est donc problématique dans l'évaluation et la comparaison de l'efficacité des outils. Le déficit de fiabilité des deux types de données ne permet pas l'entraînement et la comparaison objective des outils de FDD. Il y a donc une nécessité pour la communauté scientifique et industrielle de la FDD de développer, comme cela a été fait dans le domaine de l'intelligence artificielle, une base de données universelle. En effet, avec la base de données

MNIST [116], la communauté de l'intelligence artificielle dispose de jeux de données leur permettant d'effectuer de l'apprentissage et de comparer l'efficacité de leurs méthodes. Grâce à ce référentiel commun, il y a un consensus de la communauté sur l'efficacité des méthodes. Avec ce genre de base de données, les outils de détection de défauts pourront évaluer leur efficacité sur les critères souhaités des méthodes de FDD et alors être comparés de façon objective.

### 2.3.4 Le cahier des charges du référentiel

Cette base de données de défauts de référence doit remplir un certain nombre de critères afin d'être utilisable. Ce référentiel devra se montrer d'une grande fiabilité, qui sera assurée par la fourniture du *ground truth*. Les résultats obtenus sur le jeu de données devront également être représentatifs de résultats réellement obtenus sur les systèmes qui seront équipés de l'outil testé.

Tout d'abord, concernant la génération du jeu de données, celle-ci devra être fiable afin que la communauté puisse tester ses méthodes. Il devra également être représentatif des données terrain. Comme nous l'avons vu précédemment, aucun des deux types de données utilisées actuellement dans le secteur des HVAC ne respecte ces attentes. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser des données générées expérimentalement. En choisissant d'utiliser des données expérimentales afin de tester les outils de FDD, on s'affranchit de plusieurs freins imposés par les données numériques ou obtenus sur bâtiments existants. En effet, contrairement aux données numériques, les données expérimentales sont beaucoup plus représentatives des données réelles. Elles sont d'une précision de l'ordre de celles rencontrées dans les systèmes de GTB et donc du contexte réel. Elles seront également entachées du bruit dû à la mesure des capteurs comme le sont les données traitées par les outils FDD remontés des systèmes de gestion technique (contrairement aux données simulées). De plus, en imposant un certain nombre de capteurs par système et en respectant les normes et habitudes de mise en place des capteurs, on peut s'approcher de données qui seraient obtenues sur un système instrumenté. Dans un second temps, les données expérimentales permettent aussi de pallier les problèmes inhérents aux données de bâtiments réels qui est la qualité des données. Grâce à un protocole expérimental détaillé et une génération effectuée en chambre contrôlée ou semi-contrôlée, les données générées peuvent être validées. La communauté pourra alors s'assurer que le défaut est dû aux causes devant être diagnostiquées. Un autre avantage des données expérimentales est la possibilité d'évaluer les incertitudes. Grâce aux incertitudes des différents appareils de mesure, les valeurs données peuvent être encadrées de leur incertitudes. Cela permet de résoudre un autre problème associé aux données simulées comme réelles. En revanche, bien qu'un protocole expérimental rigoureux permette de valider la génération et d'apprécier l'origine des défauts, certaines données d'entrée, telles que les données météorologique, ne sont pas maîtrisables.

La génération des données doit donc pallier les problèmes d'identification claire du défaut, permettre l'évaluation de la qualité de la détection, tout en restant représentative de données réelles. Elles doivent donc répondre à un certain nombre de critères, afin de pouvoir mener ces différentes tâches à bien. Les défauts générés doivent pouvoir être clairement identifiables, indéniables et leur apparition doit pouvoir être appréciée de façon continue. Pour que les défauts soient fiables et vérifiables il faut que les données possédant un comportement défectueux puissent être comparées à des données vierges de tout défaut. Le comportement du système comportant un défaut doit pouvoir être analysé et être facilement mis en évidence grâce à un cas en fonctionnement normal servant de confiance de base. Il faudra donc que pour chaque test, un cas avec défaut soit généré, mais également un cas en fonctionnement nominal. Les jeux de données comportant des défauts devront donc débiter par une phase durant laquelle le système fonctionne de façon nominal en régime permanent. A la suite de ce fonctionnement opérationnel, les jeux présenteront une phase de transition correspondant à l'apparition du défaut et finiront sur l'établissement d'un nouvel état constant, correspondant au fonctionnement défectueux.

Concernant la fréquence des enregistrements, les pas de temps devront être relativement proches de ceux des GTB (de l'ordre de la minute), mais devront également être assez fins pour pouvoir apprécier les évolutions de tendance et les transitions de régime. De plus, un pas de temps assez fin pourra permettre de comparer les rapidités de détection des différents outils. Ces pas de temps pourront donc être adaptés en fonction du type de système, mais devront être au moins aussi faibles que les pas de temps de ses organes de contrôle (*e.g.* mobilité d'un volet). Cela permettra de vérifier la réactivité du système aux changements de régime. Une attention particulière devra également être portée sur le type et la quantité de données récupérées pour un système. Pour être représentatives d'un système de GTB réellement mis en place, seules les informations usuellement relevées devront être fournies. De plus, seuls les points de mesures nécessaires devront être relevés, car en pratique toutes les mesures des différentes variables ne sont pas prises en tout point du système. Pour des raisons évidentes de coût, seules les données nécessaires à l'estimation du bon fonctionnement sont habituellement relevées.

Le nombre de systèmes, d'équipements et de régulations possibles dans le domaine du CVC est extrêmement important. Ce type de démarche doit être reproduite pour le plus grand nombre de configurations possibles afin de pouvoir être le plus exhaustif. Néanmoins, il semble indispensable au secteur de la détection de défauts des systèmes HVAC de s'équiper de ce type de banque de données. De plus, d'un point de vue strictement pratique ce type de *database* permet de tester les outils et méthodes de FDD, comme évoqué précédemment, de façon plus proche de la réalité que sur des données simulées. Cela permet également de régler les problèmes avant un test in-situ beaucoup plus coûteux.

## 2.4 Elaboration d'un référentiel

### 2.4.1 Le cadre

Dans le secteur du bâtiment, un grand nombre de systèmes CVC existe et sont utilisés à des fins différentes allant du confort thermique, à la qualité de l'air intérieur. Parmi toutes les possibilités de systèmes, nous avons choisi de nous concentrer sur les systèmes de ventilation pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ce type de système de ventilation mécanique est extrêmement répandu dans le résidentiel comme dans le tertiaire, car il contribue au renouvellement de l'air vicié des bâtiments. Ensuite avec l'évolution des réglementations relatives aux économies d'énergie, ce type de système avec des récupérateurs d'énergie, est de plus en plus installé dans les bâtiments. De plus avec l'accroissement de l'attention sur la qualité de l'air intérieur, le contrôle et le suivi de ces systèmes va avoir tendance à se renforcer. En effet, les objectifs de la qualité de l'air intérieur vise souvent à maximiser les renouvellements d'air afin de purifier l'ambiance intérieure. Bien évidemment, dans les conditions où l'air extérieur est moins pollué que l'intérieur. Cette finalité entre donc en opposition directe avec les objectifs d'efficacité énergétique. Ceux-ci cherchent au contraire à réduire au minimum les taux de renouvellement afin d'éviter l'introduction d'air neuf qui augmentent les besoins énergétiques du bâtiment. C'est pourquoi une fine régulation couplée à un suivi doit être mis en place sur les CTA afin de permettre d'assurer ces deux fonctions antagonistes efficacement. De nombreux travaux ont été réalisés dans la littérature sur l'application de méthodes de FDD sur des CTA renforçant la nécessité d'une banque de données sur ce système [15, 182].

## 2.4.2 Matériel et Méthode

Dans cette section sont développés les éléments importants pour générer des données expérimentales permettant l'élaboration d'un référentiel pour la comparaison des outils de FDD.

### 2.4.2.1 Présentation générale

Pour la génération de ces données expérimentales une CTA a été sélectionnée car c'est un système extrêmement répandu dans tous les types de bâtiment et qui possède l'avantage d'être utilisé tout au long de l'année. En effet, contrairement aux systèmes *saisonniers*, les centrales de traitement d'air fournissent de l'air sain au bâtiment durant l'intégralité de l'année. De plus, le traitement de cet air est également annuel et diffère en fonction de la saison [153]. Ainsi ce système possède une analyse fonctionnelle relativement riche et nécessitant d'être suivie constamment sur l'année. Afin de pouvoir couvrir une large gamme de possibilités, il a été retenu un type de ventilation pouvant être rencontré dans les secteurs du résidentiel comme du tertiaire. Un système double flux de moyenne taille à débit d'air constant et une seule branche, présenté dans la Figure 2.3 a été sélectionné pour cette étude.

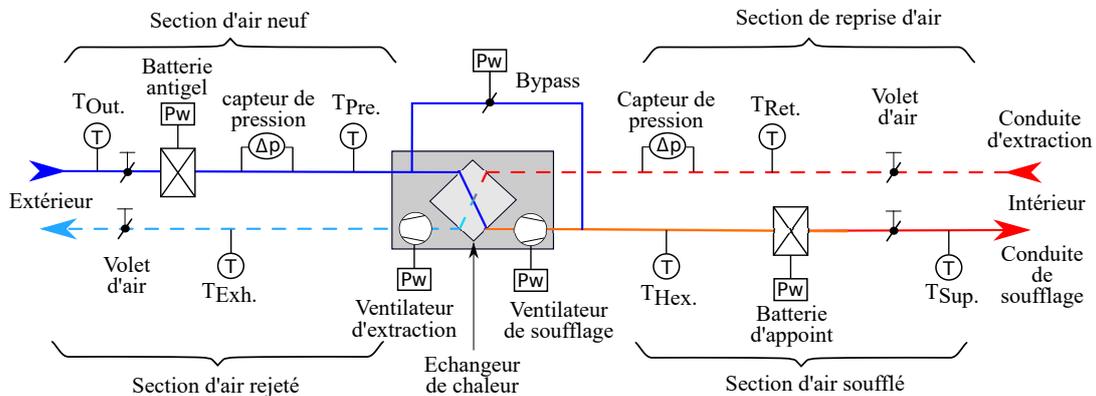


Figure 2.3 – Schéma de principe de la CTA.

Ce système peut être utilisé pour fournir les débits d'air minimaux de deux logements de sept pièces avec un débit maximal de  $260\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  au regard de la réglementation française [30]. Le système est composé d'une conduite de soufflage, permettant de traiter l'air extérieur avant le soufflage dans les pièces et d'une gaine d'extraction permettant de récupérer l'air vicié intérieur afin de l'évacuer en dehors du bâtiment. La conduite de soufflage est composée d'une section *d'air neuf* et d'une section *d'air soufflé*, alors que la conduite d'extraction comporte une section *de reprise d'air* et une section *d'air rejeté*. La ventilation est équipée d'un système de récupération d'énergie de type échangeur de chaleur à plaques à courants croisés. Ainsi l'air neuf extérieur est réchauffé par l'air repris avant d'être introduit dans l'enceinte du bâtiment. L'échangeur est équipé d'un volet d'air et d'un bypass afin de pouvoir éviter tout échange d'énergie entre les deux conduites. Une batterie de chauffage électrique est positionnée sur la gaine de soufflage en amont de l'échangeur. Cet élément de chauffe fait office de batterie anti-gel, afin d'éviter tout gel dans l'échangeur à plaques dû à un problème de condensation dans l'échangeur en raison de forts écarts de température de part et d'autre des plaques. Une seconde batterie est mise en place sur la même conduite en aval de l'échangeur pour chauffer l'air à introduire dans le bâtiment jusqu'à la température de consigne. Sont également présents sur le système quatre volets d'air manuels, positionnés sur chacune des sections, ce qui permet de régler les pertes de charge pour équilibrer les débits d'air. Les gaines d'air sont protégées des environnements extérieurs grâce à des bouches de protection (réglables pour l'insufflation et la reprise).

La génération des données est effectuée dans une pièce située au premier étage d'un bâtiment scolaire, situé au Bourget du Lac, France. La pièce à réguler est présentée dans la Figure 2.4, elle est composée de deux murs donnant sur l'extérieur orienté  $250^\circ$  Ouest et  $160^\circ$  Sud. La façade Sud comprend une porte donnant sur l'extérieur de dimensions  $[1.9\text{ m} \times 2.1\text{ m}]$  et la façade Ouest fenêtre pour une surface vitrée totale de  $12\text{ m}^2$  (trois fois  $2.6\text{ m} \times 3.3\text{ m}$  et une de  $2.3\text{ m} \times 1.48\text{ m}$ ). La pièce est composée de deux autres portes, une double donnant sur un local tampon qui a été condamné et isolé et une donnant sur un commun chauffé. Les dimensions de la pièce sont d'environ  $84\text{ m}^2$  avec une hauteur sous plafond de  $2.64\text{ m}$ . Le local d'enregistrement se situe dans une pièce tampon voisine où se trouve également la CTA. Cela correspond environ aux dimensions du logement moyen français, composé de 4 pièces, selon l'INSEE [84]. D'après la réglementation française correspondante [88] un bâtiment de logement composé de quatre pièces principales doit recevoir un apport en air neuf d'au moins  $90\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et de  $120\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  en cas de génération de pollution intérieure (i.e. cuisine). Ce débit d'air hygiénique correspond à un taux de renouvellement d'air compris entre  $0.4\text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$  et  $0.55\text{ vol} \cdot \text{h}^{-1}$ .

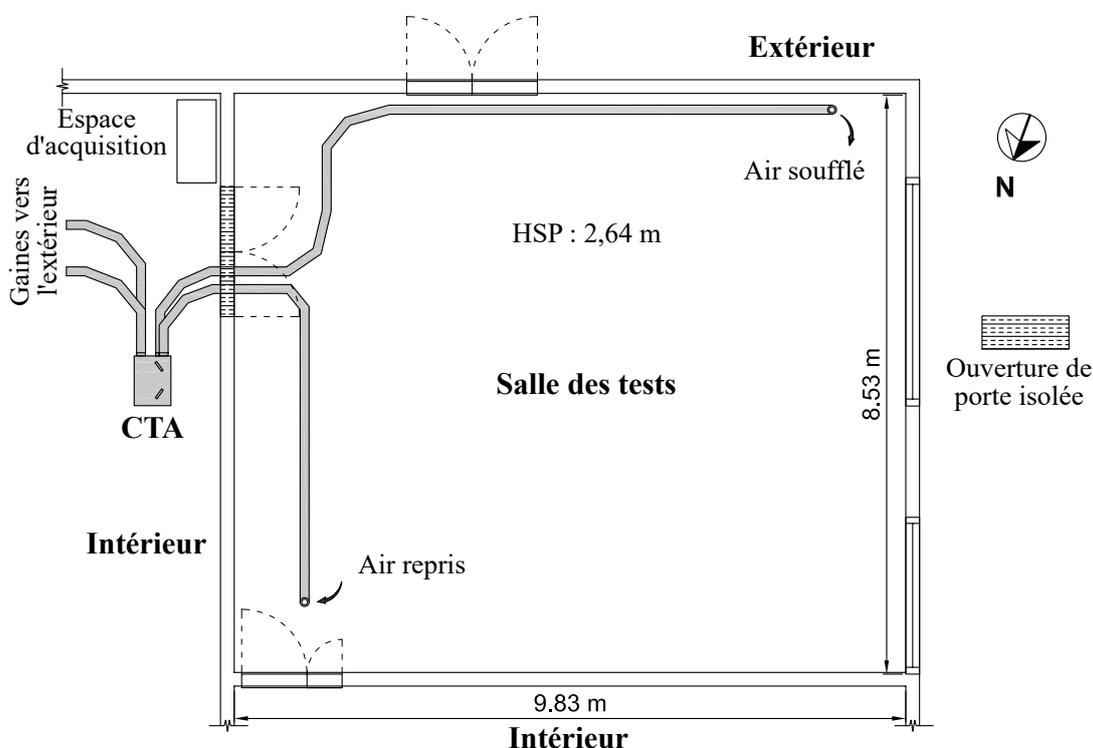


Figure 2.4 – Plan simplifié de la salle alimentée par la CTA.

#### 2.4.2.2 Détail des équipements techniques

Le principal élément de ce système de ventilation provient d'un produit du fournisseur *France Air* appelé DFX 90. Ce système de ventilation comprend deux ventilateurs, deux filtres, un système de récupération d'énergie ainsi qu'un bypass qui lui est associé. La DFX 90 a été agréementée d'équipements supplémentaires, deux batteries chaudes électriques ainsi que des volets d'air manuels et circulaires.

Le caisson principal accueillant l'échangeur de chaleur est composé d'une isolation de  $25\text{ mm}$  de polystyrène protégé par une structure en acier galvanisé. Les débits sont assurés par deux ventilateurs radiaux à deux vitesses, à commutation manuelle alimentés en monophasé.

Les filtres placés sur le circuit d'air neuf et d'air vicié sont respectivement des filtres ISO ePM10 50% (M5) et ISO grossier 90% (G4). Le rendement annoncé par le constructeur de l'échangeur est de 90%. Le bypass associé à cet échangeur est un volet d'air ne pouvant se positionner que sur deux positions, complètement ouvert ou fermé. Concernant les raccordements aux gaines, les raccords d'arrivée et de fourniture d'air neuf se font en diamètre 125mm. Le retour de l'air vicié dans la CTA se fait via une connection en 125 mm et quatre en 80 mm, et le rejet de l'air vicié en 125 mm. Les raccords pour le retour de l'air vicié inutilisé peuvent être bouchés par des caches. La conduite d'air neuf ainsi que la branche de retour d'air vicié sont isolées.

Les batteries électriques (antigel comme d'appoint) proviennent aussi du fabricant *France Air* et sont référencées comme SYSTAIR CIREC A 2. Elles sont alimentées en monophasé et permettent de fournir une puissance maximale de 1,6 kW. Elles doivent être traversées par un débit minimal de  $95 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Ces batteries sont contrôlées par des températures minimales et maximales dans la gaine, ainsi qu'une température de consigne et leur régulation est effectuée en PID.

Les registres circulaires sont à fermeture manuelle afin de régler le débit par perte de charge et ils sont placés sur chacune des conduites principales. Ils sont également équipés de membrane et de prise de pression afin de pouvoir fournir un débit. Ces registres du fabricant CAIROX sont en acier galvanisé et possèdent une classe d'étanchéité à l'air C au regard de la réglementation Européenne EN 1751.

### 2.4.2.3 Protocole de suivi

*Les données mesurées :*

Concernant les capteurs mis en place sur la CTA, il y a trois types de mesures : (i) la température d'air, (ii) la différence de pression de part et d'autre du diaphragme, (iii) les puissances absorbées par les équipements électriques. Les données recueillies correspondent aux informations habituellement contrôlées par les système de GTB [16, 101]. Elles permettent le suivi de l'évolution des températures, des débits circulant dans les gaines, l'état de contrôle des équipements et les puissances absorbées. Les températures sélectionnées sont celles représentatives des conditions intérieures et extérieures au bâtiment, celles utilisées pour l'évaluation des performances de l'échangeur et le fonctionnement des batteries. Les débits permettent la vérification de l'équilibrage des réseaux et sont utilisés dans le calcul de l'efficacité de l'échangeur. Les puissances des équipements électriques sont utilisées à des fins de contrôle. Toutes ces informations sont projetées en temps réel sur une interface *Labview* durant les tests, pour contrôler l'état du système et vérifier le bon enregistrement des mesures.

Les températures d'air T [°C] sont enregistrées en six points différents de la CTA. Quatre sont situés sur la conduite de d'air neuf et deux sur la conduite d'air vicié. Sur la conduite d'air neuf l'air extérieur, préchauffé, à la sortie de l'échangeur et de soufflage sont relevées. Sur l'air vicié, la température de retour des pièces et la température de l'air rejeté sont enregistrées. L'emplacement des capteurs est représenté sur le schéma de principe de la CTA en Figure 2.3. Ces températures ont été retenues car elles correspondent à celles qui sont régulièrement surveillées par les GTB, utilisées dans les outils de FDD [5, 158] et utilisées dans le calcul d'efficacité de l'échangeur [2]. Toutes les températures relevées pour cette génération de données d'entrée sont mesurées par redondance physique via deux thermocouples. C'est la température moyenne calculée à partir de ces deux mesures qui sera présentée par la suite. La méthode de redondance physique est utilisée pour garantir la fiabilité des données expérimentales.

Lors des générations de données d'été, les batteries ne sont pas utilisées. La température d'air préchauffé (sortie de la batterie antigel) est alors considérée comme identique à la température

d'air extérieur  $T_{pre} \approx T_{out}$ . Cette hypothèse d'égalité des températures est également formulée pour les températures à la sortie de l'échangeur et de soufflage (sortie de la batterie d'appoint)  $T_{hex} \approx T_{sup}$ . Cette hypothèse a été vérifiée pour chaque jeu de données en certifiant que l'écart type moyen entre les deux est inférieur à l'incertitude maximale de la mesure (environ  $0.3^\circ\text{C}$ ).

Toutes les températures sont mesurées à l'aide de capteurs thermocouples. Deux différentes technologies ont été utilisées selon la norme Européenne EN 60584 : des thermocouples nickel-chrome/nickel connus sous le nom de type K, et cuivre/cuivre-nickel connus sous le nom de type T. Les mesures sont directement collectées par une centrale d'acquisition *KEYSIGHT 34972 LXI Data Acquisition*, à un pas de temps de cinq secondes. Le pas d'acquisition a été choisi afin de pouvoir analyser précisément l'évolution des températures dans le système. Ce choix a été conditionné par un calcul simple à partir de la vitesse minimale dans les gaines ( $2.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et la distance maximale entre deux sondes sur une même gaine (environ 10 m). Ce pas de temps de cinq secondes permet d'enregistrer avec précision les changements de régime du système. La fréquence d'enregistrement sélectionnée pour l'étude est bien plus élevée que celle habituellement rencontrée dans les systèmes de GTB (de l'ordre de la minute). Mais le choix a été fait de privilégier la génération de données plus précises, qui pourront facilement être traitées pour obtenir des données avec un pas de temps plus grossier. Par ailleurs, avec des données plus précises, la rapidité de détection des outils de FDD pourra être facilement comparée.

Avant la mise en place, les thermocouples ont été calibrés par comparaison à un capteur de référence, une PT100 à quatre points (AN5847, AOIP, France). La calibration a été réalisée sur une plage de  $[-20, 45]^\circ\text{C}$  tous les cinq degrés (soit 16 paliers) par échelons croissants de la température. La procédure de calibration est la suivante : tous les thermocouples et la sonde de référence ont été immergés dans un bain glycolé thermostaté. Tous les capteurs ont été placés dans un bloc de cuivre afin d'homogénéiser la température du bain. Chacun des seize paliers de température a été maintenu durant au moins dix minutes. Les températures ont été enregistrées avec un pas de temps de cinq secondes et la température moyenne de cet enregistrement a été utilisée pour réaliser l'étalonnage des thermocouples. Un polynôme de correction d'ordre trois a alors été calculé afin de minimiser l'erreur de chacun des capteurs par rapport à la sonde de référence. Ensuite une phase de vérification de la validité des mesures est effectuée sur une plage  $[-20, 45]^\circ\text{C}$  tous les cinq degrés par échelons décroissants de température. Après la correction des valeurs des thermocouples, le coefficient de corrélation a été calculé pour chaque thermocouple. La valeur de ces coefficients est comprise entre 0.99 et 1 avec un écart type maximal de  $0.2092^\circ\text{C}$ , sur toute la plage de calibration.

Les registres circulaires permettent la mesure de la différence de pression  $\Delta p$  [Pa] de part et d'autre de l'iris grâce à un diaphragme. Les capteurs de pression utilisés (série SDP610, *Sensirion*, Suisse) ont une précision annoncée de 3% de la mesure. Ces capteurs sont connectés à un microcontrôleur *Arduino UNO* pour l'enregistrement des mesures. Le même pas de temps de cinq secondes que pour les températures est retenu pour la mesure des différences de pression.

Pour finir, toutes les puissances consommées  $P$  [W] par les équipements électriques sont mesurées par l'appareil *Energy Logger 4000* (*Voltcraft*, Allemagne). D'après le constructeur la précision de la mesure varie entre 1% et 15% en fonction de la plage de mesure. Les mesures sont stockées sur une *Secure Card* à un pas de temps de 60 secondes, qui est imposé par l'appareil. Toutes ces incertitudes sont regroupées dans le Tableau 2.1.

*Les données calculées :*

À partir des données mesurées, présentées précédemment, certains paramètres ou indicateurs sont calculés. Premièrement le débit  $Q_v$  [ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ] est calculé avec l'équation suivante :

$$Q_v = k \cdot (\Delta p)^n, \quad (2.1)$$

où  $n = 0.5$  (donnée fabricant) et le coefficient  $k$  est à adapter en fonction de l'ouverture du volet circulaire. Pour ce produit,  $k$  est susceptible de varier entre 1 et 7.

Ensuite l'efficacité sensible de l'échangeur est donnée d'après l'équation suivante préconisée par l'AHRI et l'ASHRAE [2, 7] :

$$\eta = \frac{(T_{sup} - T_{pre}) \cdot Q_{v,sup} \cdot \rho_{sup} \cdot c_{sup}}{(T_{ret} - T_{pre}) \cdot Q_{v,min} \cdot \rho_{min} \cdot c_{min}}, \quad (2.2)$$

où  $T_{sup}$  est la température de soufflage,  $T_{pre}$  la température de préchauffage et  $T_{ret}$  la température de reprise de l'air intérieur. Les quantités  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] et  $c$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] correspondent respectivement à la masse volumique et la capacité thermique massique. Ces deux grandeurs sont considérées comme constantes au regard des gammes de températures rencontrées dans le domaine du bâtiment. Les quantités avec les indices min sont définies comme suit :

$$\rho_{min} = \min(\rho_{sup}, \rho_{exh}), \quad c_{min} = \min(c_{sup}, c_{exh}), \quad Q_{v,min} = \min(Q_{v,sup}, Q_{v,exh}),$$

Les indices *sup* et *exh* signifient respectivement soufflage et extraction.

La troisième grandeur est le flux chaleur échangé dans l'échangeur  $\phi$  [W]. Il est calculé comme suit :

$$\phi = Q_{v,min} \cdot \rho_{pre} \cdot c_{pre} \cdot (T_{hex} - T_{pre}). \quad (2.3)$$

où l'indice *pre* signifie température pré-échangeur.

#### 2.4.2.4 Propagation d'incertitude

Afin de renforcer la pertinence et la confiance (*ground truth*) du jeu de données d'entrée, un calcul de propagation d'incertitude a été réalisé sur les données mesurées. Ainsi tous les résultats et les figures présentées dans le cadre de ce travail sont fournis avec un bande grise symbolisant les incertitudes associées à la ligne représentant les valeurs mesurées .

Pour évaluer les incertitudes associées aux valeurs expérimentales, trois différentes méthodes ont été utilisées. Le Tableau 2.1 synthétise les incertitudes associées aux valeurs correspondantes. Premièrement, pour les valeurs obtenues par redondance physique, les mesures effectuées sont considérées comme précises et justes, du fait de la calibration des thermocouples. Ainsi, la valeur présentée est la moyenne des deux valeurs mesurées, et l'incertitude associée à cette mesure correspond à l'écart type associée à cette population.

Pour les valeurs issues d'une mesure directe de la grandeur physique, l'incertitude donnée est celle du capteur associé à cette mesure, fournie par le fabricant. Ainsi, la précision des mesures de consommation d'énergie est donc précise à 1% de 5W à 3500W, 5% de 2W à 5W et de 15% pour les valeurs inférieures à 2W, selon *Voltcraft*. La pression est directement enregistrée par un capteur avec une précision de 3%. Pour ces deux grandeurs physiques les incertitudes qui seront présentées seront donc les précisions des capteurs.

Finalement pour les grandeurs physiques calculées, comme les débits, l'efficacité ou le gain dans l'échangeur, un calcul de propagation d'incertitude est effectué selon la méthode proposée par [160]. La formule générale de l'incertitude pour une grandeur  $f$  est la suivante :

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \sigma_{x_i} \right)^2},$$

où,  $x_i$  est l'une des  $N$  variables incertaines de  $f$  et  $\sigma_{x_i}$  est l'écart type de  $x_i$ . Le débit d'air est calculé selon l'équation (2.1). Deux variables comportent donc des incertitudes dans cette équation, le coefficient  $k$  et la différence de pression  $\Delta p$ , l'incertitude sur le débit est donc :

$$\sigma_Q = \sqrt{\left( \frac{\partial Q_v}{\partial k} \cdot \sigma_k \right)^2 + \left( \frac{\partial Q_v}{\partial p} \cdot \sigma_p \right)^2} \quad (2.4)$$

où  $\sigma_k$  et  $\sigma_p$  les incertitudes associées au volet d'air et à la différence de pression. Les quantités  $\frac{\partial Q_v}{\partial k}$  et  $\frac{\partial Q_v}{\partial p}$  sont directement obtenues par dérivé de l'équation. (2.1). Concernant l'efficacité de l'échangeur, les incertitudes sont données par :

$$\sigma_\eta = \sqrt{\left( \frac{\partial \eta}{\partial Q_v} \cdot \sigma_Q \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial T} \cdot \sigma_T \right)^2},$$

où  $\sigma_Q$  est l'incertitude associée au débit donnée par l'Eq. (2.4) et  $\sigma_T$  l'incertitude de la température. Les quantités  $\frac{\partial \eta}{\partial Q_v}$  et  $\frac{\partial \eta}{\partial T}$  sont obtenues en dérivant l'Eq. (2.2). Les incertitudes associées au gain dans l'échangeur sont calculées comme suit :

$$\sigma_\phi = \sqrt{\left( \frac{\partial \phi}{\partial Q_v} \cdot \sigma_Q \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial \rho} \cdot \sigma_\rho \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial C} \cdot \sigma_C \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial T} \cdot \sigma_T \right)^2}$$

où  $\sigma_\rho$  et  $\sigma_C$  sont respectivement les incertitudes associées à la masse volumique et à la capacité massique de l'air. Les différences partielles sont obtenues par dérivé de l'Eq. (2.3). Le Tableau 2.1 regroupe les incertitudes associées aux différentes quantités mesurées.

#### 2.4.2.5 Génération des jeux de données pour fonctionnement nominal et défectueux

L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthode pour générer des données d'entrée expérimentales du système présenté dans la Figure 2.3 pour les outils de FDD afin de permettre un comparaison objective de leur performance. Des jeux de données sont fournis pour des fonctionnements nominaux et défectueux pour permettre la comparaison et l'acquisition de la *vérité fondamentale* (*ground truth*) des données.

**Classification des types défauts** Il est important de définir ce qui est considéré comme défaut dans le cas étudié. Est caractérisé comme défaut tout état ou comportement empêchant le système étudié de fonctionner de façon appropriée. Trois catégories de fautes sont générées : (i) des *hard faults*, (ii) des *soft faults* et (iii) des *control faults*. Parmi ces catégories de défauts certains apparaissent seulement selon des modes de fonctionnement spécifique du système et donc sous

Tableau 2.1 – Synthèse des quantités mesurées et de leurs incertitudes.

Quantité	Évaluation de l'incertitude	Valeurs
Température $T$	redondance physique	$\sigma_T \in [6.36 \cdot 10^{-6}, 0.062]$ K
Puissance $P$	fonction de la puissance consommée	$P \geq 5$ W $\Rightarrow \sigma_p = P \cdot 0.01$ W $P \in [2, 5]$ W $\Rightarrow \sigma_p = P \cdot 0.05$ W $P \leq 1$ W $\Rightarrow \sigma_p = P \cdot 0.15$ W
Débit $Q_v$	propagation des variables incertaines $k$ et $p$	$\sigma_k = 3.6$ $\sigma_p = 0.1$ Pa $\sigma_Q \in [0, 24.84]$ m <sup>3</sup> . h <sup>-1</sup>
Efficacité de l'échangeur $\eta$	propagation des variables incertaines $T$ et $Q_v$	$\sigma_T \in [0.018, 0.298]$ K $\sigma_Q \in [0, 24.84]$ m <sup>3</sup> . h <sup>-1</sup>
Flux de chaleur échangé $\phi$	propagation des variables incertaines $Q_v, \rho_{pre}, C_{pre}$ et $T$	$\sigma_Q \in [0, 24.84]$ m <sup>3</sup> . h <sup>-1</sup> $\sigma_p \in [0.0237, 0.0241]$ kg . m <sup>-3</sup> $\sigma_C = 1.5075$ J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> $\sigma_T \in [0.032, 0.298]$ K

certaines saisons, alors que d'autres peuvent apparaître tout au long de l'année. Pour cela les défauts ont également été classifiés en trois sous catégories en fonction de leur période d'apparition. Les défauts du système concernant le fonctionnement en période de chauffe, seront classés sous l'appellation de *défauts d'hiver*. Les défauts apparaissant en période estivale seront appelés *défauts d'été* et les défauts n'étant pas dépendant d'une saisonnalité seront référencés comme *défauts globaux*.

Les défauts ont été générés durant deux campagnes, une dans chaque saison. Les tests réalisés durant la saison estivale ont été effectués entre la mi-juin et la mi-octobre de l'année 2019. Les jeux générés en hiver ont été réalisés entre décembre 2019 et février 2020. La densité de probabilité des températures enregistrée durant ces tests est présentée dans la Figure 2.5. Cette dernière donne la densité de probabilité des températures intérieures et extérieures durant les tests pour chaque saison.

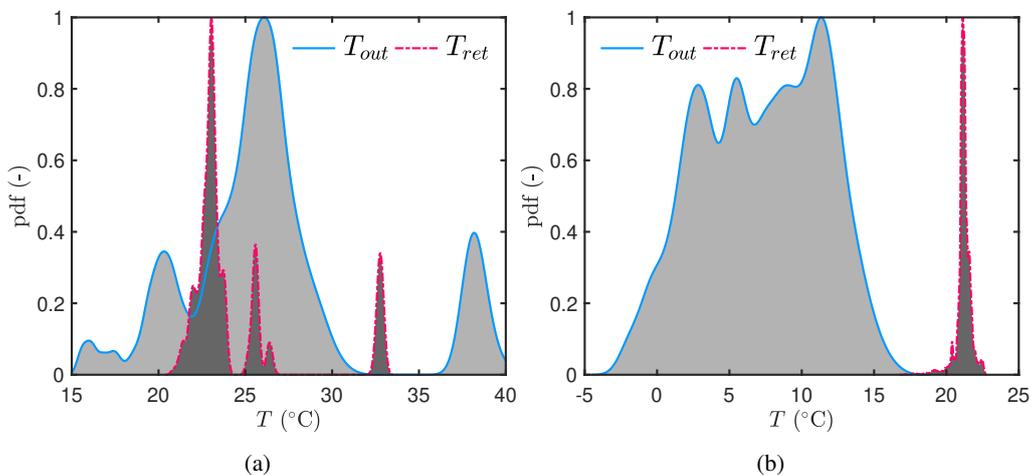


Figure 2.5 – Densité de probabilité des températures pour la saison d'été (a) et d'hiver (b).

**La sélection des défauts** Une sélection de défauts couramment rencontrés dans les CTA [150, 182] a été retenue pour ce premier jeu de données d’entrée. Les défauts sélectionnés couvrent un certain nombre de type de défauts sur les trois périodes. Concernant les défauts globaux, pouvant se produire n’importe quand dans l’année, les *hard faults* retenus sont la panne des ventilateurs, l’obstruction des gaines de soufflage, la rupture de la courroie des ventilateurs. Un seul *soft fault* a été sélectionné, l’encrassement des filtres à air.

Pour les défauts spécifiques à la saison d’été, il a été retenu la *hard fault* suivante, obstruction du registre du bypass et la *control fault* suivante, bypass damper failure.

Pour les défauts hivernaux, les *hard faults* sélectionnés sont, panne de la batterie antigel et panne de la batterie de soufflage. Les *control faults* étudiés sont les problème de régulation de batterie antigel.

L’intégralité des défauts sélectionnés est présenté dans le Tableau 2.2 .

Tableau 2.2 – Synthèse des défauts étudiés.

Catégorie du défaut	Type de défaut	Nom du défaut
Global	Hard	Panne du ventilateur
	Hard	Obstruction des gaines
	Hard	Rupture de la courroie ventilateur
	Soft	Encrassement des filtres
Eté	Hard	Obstruction du registre du bypass
	Operation	Régulation du registre du bypass
Hiver	Hard	Panne de la batterie antigel
	Hard	Panne de la batterie d’appoint
	Operation	Régulation de la batterie antigel

On constate que le choix de ce système et de ses composants permet un nombre de défauts limités. Néanmoins, le choix de ces défauts induit un nombre de 114 cas, 44 générés en saison estivale et 70 en saison hivernale. Ces cas sont présenté dans la Figure 2.6.

**Conception des protocoles expérimentaux pour la génération des jeux de données** Des données concernant le fonctionnement nominal du système et des données présentant le comportement du système lors de l’apparition des défauts étudiés. Tous les jeux de données seront enregistrés durant au moins cinq minutes, afin de présenter un état stationnaire. Comme expliqué dans les Sections 2.3.4 et 2.4.2.3 le pas de temps choisi, inférieur à celui d’une GTB, est de 5 secondes. Ce choix de pas de temps permet de s’assurer de l’apparition des défauts (*ground truth*) en ayant une observation quasi-continue des phénomènes. Pour l’évaluation des méthodes de FDD, un filtre des données peut être réalisé pour se rapprocher d’un pas de temps d’acquisition de GTB.

#### *Le fonctionnement nominal*

Il existe plusieurs fonctionnements nominaux possibles en fonction des saisons ou des conditions dans lesquelles se trouve le système. Lors des fonctionnements nominaux, les débits doivent respecter les valeurs attendues et être équilibrés. Le fonctionnement des équipements doit respecter les règles de l’analyse fonctionnelle afin d’atteindre les consignes souhaitées. Concernant la génération de ces données, le système est mis en régime nominal durant une période permettant la stabilisation des conditions de fonctionnement. Une fois le système en fonctionnement correct et

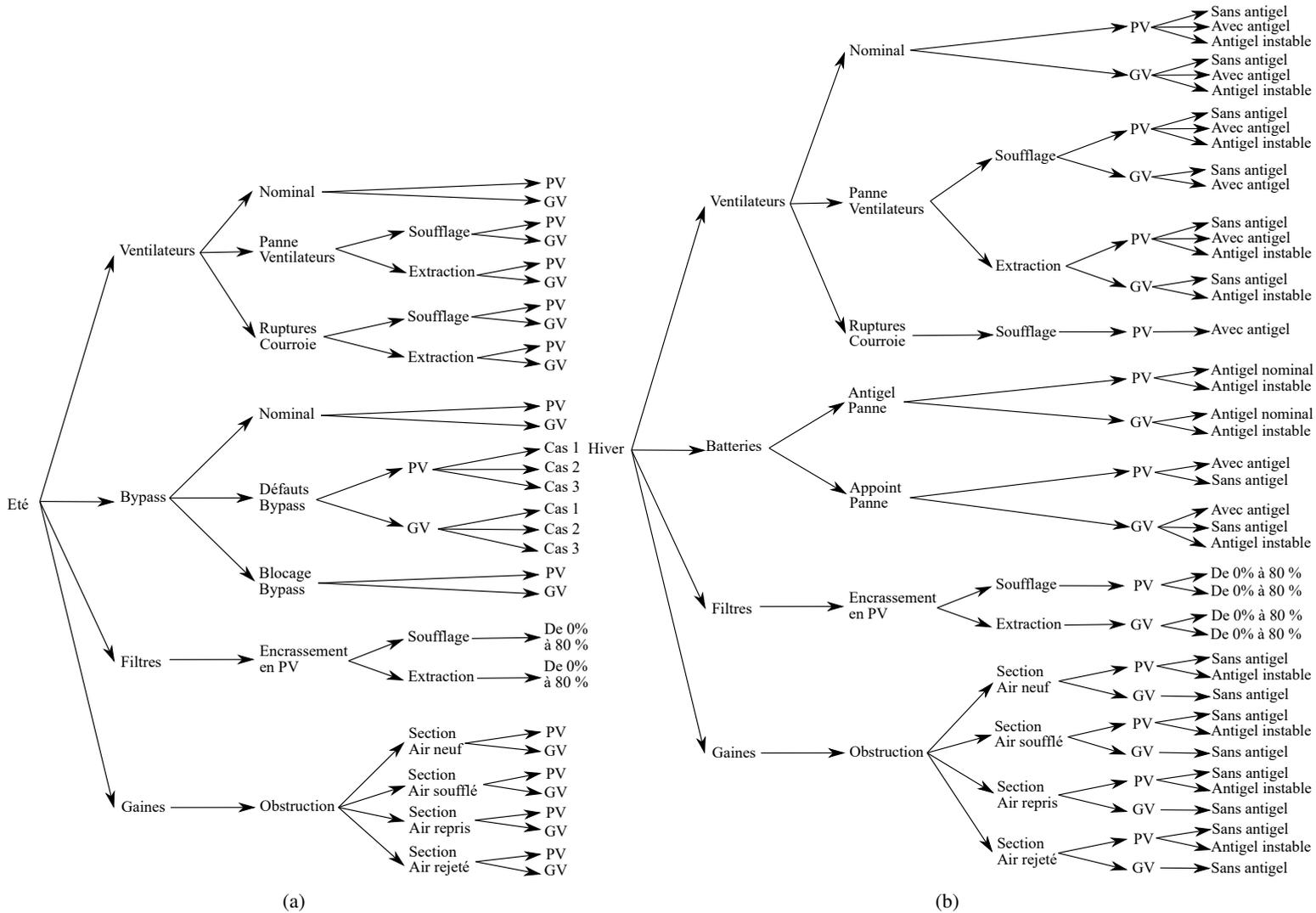


Figure 2.6 – Arbres des défauts réalisés durant la saison d'été (a) et d'hiver (b).

dans un régime considéré comme établi, les données sont enregistrées.

### Les défauts globaux

Le défaut *panne de ventilateur* a été réalisé pour les deux ventilateurs présents sur la CTA et pour les deux vitesses de fonctionnement de ces derniers. Pour la création du défaut, un contacteur a été mis en place sur chaque alimentation en courant des ventilateurs. Ainsi après une période de fonctionnement stationnaire en régime nominal, l'alimentation d'un ventilateur est intentionnellement coupée à l'aide du contacteur associé. L'activation du contacteur entraîne donc l'arrêt de l'appel de puissance (mesuré par les capteurs *Energy Logger 4000*) et le ventilateur s'arrête, simulant une panne.

Le défaut *rupture de la courroie du ventilateur*, est également généré pour les deux ventilateurs et les deux vitesses de fonctionnement. Pour générer ce défaut, le commutateur est utilisé pour couper l'alimentation du ventilateur étudié comme lors du défaut présenté précédemment. Ainsi les conséquences en terme d'évolution des températures et débits dans les gaines sont similaires à celles de la panne du ventilateur. Le débit dans la gaine alimentée par le ventilateur défectueux diminue jusqu'à s'arrêter et les températures évoluent librement. Mais dans le cas d'une rupture de

courroie, le moteur servant à mettre en mouvement les pales reste en activité et donc utilise encore de l'énergie. Afin de simuler ce comportement, les données de l'appel de puissance du ventilateur enregistrées sont remplacées par de nouvelles données. Ces nouvelles données de puissance du ventilateur sont obtenues en enregistrant le fonctionnement du ventilateur préalablement extrait de la CTA, afin de diminuer les pertes de charge liées au réseau. En bref, les données du défaut de rupture de courroie sont composées des données de température, pression et débit induits par l'arrêt du ventilateur et des données de puissance de ventilateur générées spécialement pour ce test.

L'encrassement des filtres étant un phénomène continu et dont l'effet n'apparaît qu'après plusieurs mois voir années de fonctionnement. Un protocole recréant les conditions observées dans ce genre de défaut a été développé. Lors de l'encrassement d'un filtre, la collecte des particules ou éléments qui entraînés par la dépression du ventilateur dans le filtre entraîne sont colmatage. Cela se traduit par une augmentation de la perte de charge dans le réseau (modification de la courbe réseau) et donc à une diminution du débit de ventilation (s'il n'y a pas de modification de la vitesse). Ce phénomène est illustré par la Figure 2.7. L'encrassement étant lent et continu, il a donc été choisi de représenter différents états de colmatage du filtre. Ainsi le protocole expérimental consiste à obstruer une partie du filtre allant de 0% à 80% de la surface du filtre par pas de 10%. L'obstruction est réalisée à l'aide d'adhésif aluminium d'étanchéité et de jointoiement de gaine de ventilation, répartis sur la surface du filtre de la façon la plus homogène possible.

Un protocole expérimental complémentaire consistant à colmater le filtre avec des particules pouldolite (PM<sub>10</sub>) a été mis en place pour la campagne hivernale. Il a pour objectif de valider le premier et de fournir des temps d'encrassement moyens correspondant aux mêmes pertes de charge que celles générées avec les bandes adhésives. Ce second protocole et ses résultats sont présentés en Annexe A.

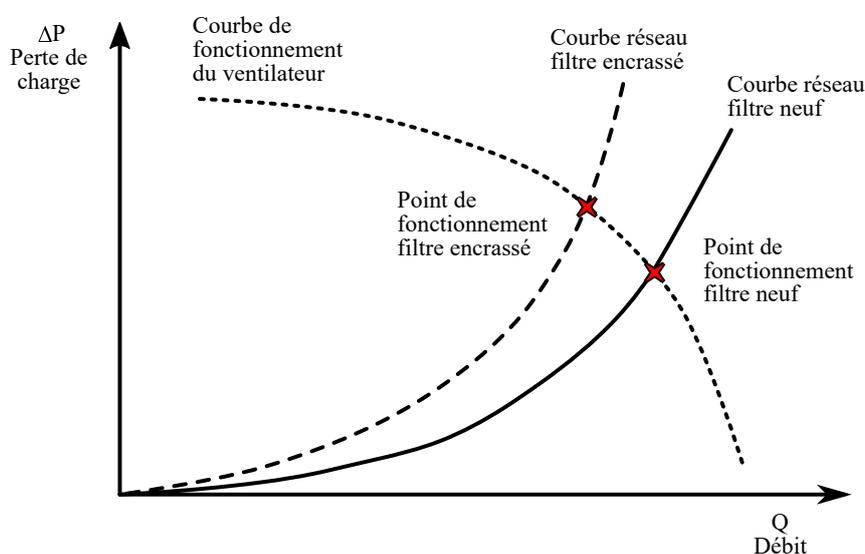


Figure 2.7 – Points de fonctionnement du ventilateur.

Le défaut d'obstruction des gaines est une *hard fault* apparaissant lorsque par exemple un utilisateur peu consciencieux des règles d'hygiène, ferme une bouche d'aération. Ceci arrive régulièrement dans les pièces lorsque la ventilation induit une nuisance sonore par exemple, ou lorsque le système n'est pas réalisé avec attention et qu'une gaine est compressée mécaniquement. Ce défaut peut affecter toutes les sections des conduites de la ventilation et c'est donc ce qui a été réalisé pour les quatre branches présentes sur le système étudié. Les tests ont consisté à obstruer partiellement une conduite grâce à la fermeture du volet d'air, les trois autres volets restant dans leur position initiale. Le test a été répété avec les quatre conduites (air neuf, air rejeté, reprise d'air, air soufflé) En fermant le volet de la section étudiée, les pertes de charge augmentent considérable-

ment et les débits sont alors modifiés.

#### *Les défauts d'été*

Concernant le défaut de la saison d'été, il concerne essentiellement le volet du bypass de l'échangeur de chaleur. Ce volet d'air sert à effectuer du free-cooling (ou rafraichissement passif) en saison estivale. Le principe du free-cooling est de permettre le rafraichissement des locaux en cas de surchauffe (la température intérieure dépasse un seuil fixé) grâce à l'air extérieur. Généralement afin de maximiser la décharge de chaleur stockée dans le bâtiment, les débits sont augmentés du fait de la faible capacité thermique de l'air. Ainsi les conditions préalables à la mise en place de free-cooling sont les suivantes : une température extérieure inférieure d'un seuil choisi, par rapport à la température intérieure et une demande de rafraichissement. Dans le cas de notre système, le registre du bypass de l'échangeur de chaleur s'ouvre afin d'arrêter le transfert de chaleur ayant lieu dans le système de récupération d'énergie. Ainsi l'air extérieur ne sera pas réchauffé par l'air intérieur plus chaud.

Dans notre étude deux cas de fonctionnement nominal ont été identifiés. Le premier cas, le plus classique, correspond à celui où le ventilateur du système fournit un faible débit, alors le bypass est activé et le débit augmenté. Le second cas est celui pour lequel le système fournit déjà le débit maximal et le bypass est alors activé sans augmentation du débit possible. Pour la génération de ces cas le bypass est activé manuellement grâce à un interrupteur, lorsque les conditions free-cooling apparaissent. La règle de contrôle du bypass est présentée dans l'Eq. 2.5.

$$Byp_{ON} \stackrel{\text{def}}{=} T_{int} - T_{cons} \geq 0 \wedge T_{int} - T_{ext} - \varepsilon_T \geq 0 \quad (2.5)$$

où  $Byp_{ON}$  est l'activation du registre du bypass,  $T_{int}$  est la température intérieure des locaux,  $T_{cons}$  est la température de consigne intérieure,  $T_{ext}$  est la température de l'air extérieur et  $\varepsilon_T$  est une limite de sécurité (évitant les cycle court).

Les défauts de contrôle du bypass concernent tous les comportements du système ne correspondant pas aux fonctionnements nominaux présentés précédemment. Ces fonctionnements défectueux ont été référencés au nombre de six, trois pour le grand débit et trois pour le faible débit. Concernant les comportements défectueux du free-cooling en petit débit, ils sont les suivants, le débit augmente mais le bypass ne s'ouvre pas ; le bypass s'ouvre mais le débit n'augmente pas ; le débit n'augmente pas et le bypass ne s'active pas. Les défauts en grande vitesse sont : (i) le grand débit est maintenu mais le bypass ne s'active pas ; (ii) le bypass s'active mais le débit diminue ; (iii) le bypass ne s'ouvre pas et le débit diminue. Tous ces types de défaut sont générés manuellement par l'activation ou non du bypass et le changement de vitesse grâce aux commutateurs mis en place à cet effet.

Le défaut de l'obstruction du registre du bypass correspond à un problème d'ouverture du bypass pour des raisons mécaniques et non pas de contrôle. Dans ce scénario, le volet d'air reçoit une impulsion électrique lorsqu'il doit s'ouvrir mais ne peut pas réaliser ce changement d'état car il est physiquement bloqué. Pour réaliser ce défaut, l'ouverture du bypass a été entravée par un bloc de polystyrène des dimensions de la conduite du bypass, fixé par de l'adhésif à conduite. Ainsi l'appel de puissance pour le déplacement du registre est bien reçu mais aucune modification ne se produit dans la position du registre. Pour la génération de ce défaut, les données d'enregistrement de défaut de type régulation du registre de bypass ont été réutilisées pour les températures, les pressions et les débits, alors que les puissances sont celles enregistrées selon le protocole défini.

#### *Les défauts d'hiver*

Les défauts n'existant que durant la saison d'hiver concernent essentiellement les organes de chauffe actifs de ce système de ventilation. Il s'agit donc de : la panne de la batterie anti-gel, la

panne de la batterie d'appoint et un défaut de régulation de la batterie anti-gel.

Les défauts de la panne de batterie que ce soit la batterie anti-gel ou d'appoint, ont été générés avec les deux vitesses de fonctionnement des ventilateurs. Ces défauts étant des *hard faults*, ils surviennent soudainement lors d'un fonctionnement nominal du système. La panne de la batterie a été réalisée grâce à la mise en place de contacteurs sur les câbles d'alimentation des batteries. Ainsi lors d'un fonctionnement usuel de la batterie, le courant d'alimentation de l'équipement est stoppé de façon délibéré avec l'interrupteur. Cette action engendre donc l'arrêt de l'organe de chauffe lors d'une période de besoin, modélisant ainsi le défaut.

Le défaut concernant le problème de régulation de la batterie antigel s'attache à un problème de stabilité de la régulation. Ce problème peut être rencontré en cas de mauvais réglage de la bande passante ou du gain du régulateur dans le cas d'une régulation PID. Cela se traduit par une oscillation de la valeur réglante autour de la valeur de consigne. Afin de pouvoir réaliser la création de ce défaut, la valeur de sécurité de la batterie correspondant à la température minimale autorisée dans la conduite a été utilisée. Les batteries SYSTAIR CIREC, ont comme comportement de sécurité la fourniture de la puissance maximale lorsque la température minimale de la conduite est atteinte. Ainsi, en rapprochant la valeur minimale autorisée dans la conduite de la valeur de la consigne, la température ne peut pas se stabiliser, car la puissance maximale est fournie dès la première oscillation sous la consigne. Il en résulte alors une température à la sortie de la batterie oscillante.

## 2.5 Les résultats

Les défauts étant regroupés en trois catégories (été, hiver et global), ils ont été générés durant deux saisons. Ainsi les défauts d'hiver et d'été ont pu être illustrés et les défauts globaux ont été créés durant les deux saisons. Dans cette section, les jeux de données sont présentés sous forme de graphiques et analysés. Ainsi, le jeu peut être validé grâce à la confiance de base induite par l'analyse et la comparaison au cas nominal. Les fonctionnements nominaux sont présentés dans les sections relatives aux saisons durant lesquelles ils ont été générés. Dans un souci de compacité du document l'intégralité des défauts générés n'est pas présentée dans cette section.

### 2.5.1 Les défauts globaux

Dans cette section sont présentés les défauts globaux qui ont été générés. Les défauts ne seront analysés que pour une seule saison mais sont intégralement disponibles dans l'article [78].

#### 2.5.1.1 Panne de ventilateur

**Défaut du ventilateur de soufflage** Le jeu de données suivant présente la panne du ventilateur de soufflage. Comme constaté sur la Figure 2.8 le défaut apparaît à  $t = 13$  min à la suite d'une période de fonctionnement normal. À partir de ce moment la puissance du ventilateur de soufflage chute jusqu'à zéro, alors que la puissance apportée au ventilateur d'extraction est maintenue en condition normale. La panne du ventilateur de soufflage a un impact immédiat sur le débit circulant dans cette conduite, le faisant chuter instantanément. Le défaut peut également être mis en évidence grâce à l'évolution des températures dans les gaines comme illustré par la Figure 2.8(b). On constate bien que les températures de soufflage, de retour et rejeté sont dans un état stationnaire avant  $t = 13$  min. À partir de l'apparition du défaut, ces températures sont alors dans un régime transitoire. Après un temps d'équilibre suffisamment long  $t \simeq 25$  min les températures atteignent

alors un nouveau régime établi, correspondant au fonctionnement du système avec un défaut de débit dans la conduite de soufflage. On remarque que l'incertitude de mesure sur la température extérieure et de soufflage augmente lorsque le défaut se produit. En effet, l'air dans la gaine n'est plus mélangé de façon homogène. De la stratification thermique apparaît dans la conduite, entraînant des différences de mesure plus importantes. Ce jeu de données est considéré comme contenant un défaut car il comporte une panne de l'un des équipements, et qu'il induit un problème sanitaire dans le bâtiment. Après la panne du ventilateur de soufflage il y a un manque d'apport d'air neuf dans les pièces. L'efficacité de l'échangeur de chaleur est également un indicateur permettant de mettre en évidence ce défaut. Comme le montre la Figure 2.8(a) l'efficacité chute drastiquement d'environ 70% à 0% à l'apparition du défaut.

Des données supplémentaires concernant le défaut du ventilateur de soufflage avec un débit supérieur sont fournis dans l'article [78].

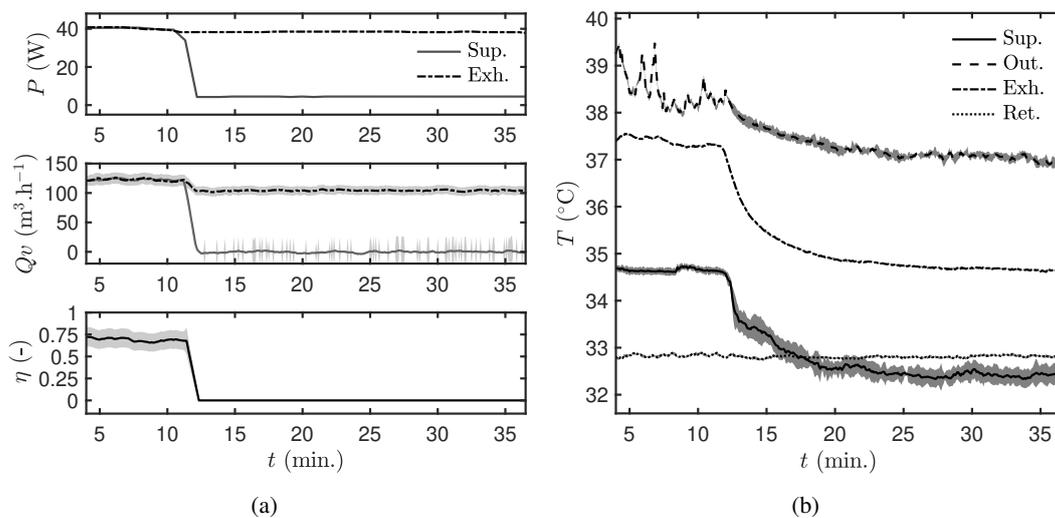


Figure 2.8 – Données expérimentales pour la panne du ventilateur de soufflage en petit débit.

**Défaut du ventilateur d'extraction** Le jeu de données présenté dans cette section concerne le défaut du ventilateur d'extraction, effectué avec le commutateur mis en place sur l'alimentation. De façon similaire au test précédent, le défaut est généré suite à une période de fonctionnement nominal en régime établi. Les mesures enregistrées dans ce test sont présentées sur la Figure 2.9. La puissance consommée par le ventilateur décroît à partir d'environ  $t = 14$  min. Le ventilateur de soufflage quant à lui continue à fonctionner normalement. Les observations qui peuvent être faites sur ce test sont similaires à celles du test de la panne du ventilateur de soufflage. La Figure 2.9(a) montre que la circulation d'air dans la conduite d'extraction est stoppée dès que l'alimentation du ventilateur est arrêtée. L'évolution des températures d'air dans les conduites présentée dans la Figure 2.9(b) est différente de celle du cas de défaut du ventilateur de soufflage. À  $t = 14$  min la température de l'air de soufflage est comprise entre la température d'air extérieur et d'air repris. L'échangeur de chaleur fonctionne donc normalement. À partir de la panne du ventilateur, plus aucun rafraîchissement n'est effectué dans l'échangeur. Ainsi pour  $t \geq 14$  min, la température de soufflage augmente jusqu'à atteindre la température de l'air extérieur. Les températures sont lissées par le fait que la conduite se situe dans la zone thermique. Ceci est corroboré par l'analyse de l'efficacité de l'échangeur présentée sur la Figure 2.9(a). Le défaut induit une chute de l'efficacité de l'échangeur. L'efficacité chute de 76% à 0%. Une rapide augmentation de l'efficacité au delà de 100% peut être constatée avant la diminution. Ceci est dû au faible pas de temps d'enregistrement des mesures. Lors de l'arrêt de l'alimentation du ventilateur, le débit d'air décroît et ainsi le dénominateur de l'équation 2.2 augmente. Ce défaut est qualifié de *hard fault* car il induit une

inaptitude du système à fonctionner correctement. En revanche contrairement au cas de la panne du ventilateur de soufflage, ce défaut ne conduit pas à des problèmes sanitaires dus au manque de renouvellement d'air.

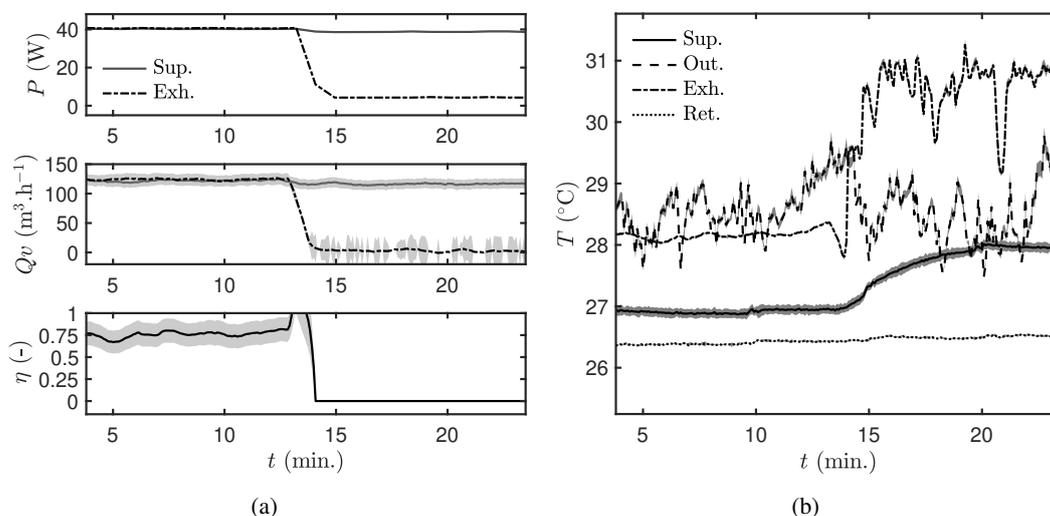


Figure 2.9 – Données expérimentales pour la panne du ventilateur d'extraction en petit débit.

### 2.5.1.2 Obstruction des gaines

Le prochain jeu de données d'entrée expérimental concerne l'obstruction de chacune des sections des deux gaines de ventilation. Pour le test présenté dans cette section, les ventilateurs fonctionnent au régime à faible débit. La Figure 2.10 présente l'évolution des débits dans les gaines durant les quatre cas d'obstruction. Les deux cas qui portent sur l'obstruction des sections de la conduite de soufflage sont compris dans la Figure 2.10(a) et les cas d'obstruction de la conduite d'extraction dans la Figure 2.10(b).

Concernant les cas d'obstruction de la section d'air neuf, deux informations importantes peuvent être mises en évidence. Premièrement, à la fermeture du volet d'air manuel durant le test, le débit de la conduite accueillant le volet chute immédiatement. En même temps le débit dans la conduite d'extraction augmente. Ainsi dans le cas d'obstruction de la section d'air neuf, la fermeture du volet induit une réduction du débit de soufflage et une augmentation du débit d'extraction. Une tendance identique peut être appréciée sur les puissances consommées par les ventilateurs, mais le phénomène est léger et compris dans les bandes d'incertitude. Un constat similaire peut également être fait sur le cas de l'obstruction de la section d'air rejeté présenté dans la Figure 2.10(b).

La Figure 2.10(a) présente aussi l'évolution des débits dans les deux conduites lors du cas de l'obstruction de la section d'air soufflé. Après la fermeture du volet, les pertes de charge augmentent induisant une diminution du débit dans la conduite. Une légère réduction du débit dans la conduite d'air extrait peut également être remarquée. Dans ce cas, le défaut induit en plus un problème sanitaire, à partir du moment où le débit d'air neuf apporté dans le bâtiment est inférieur aux  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  hygiéniques. Les mêmes conclusions peuvent être dressées pour le cas de l'obstruction de la section de retour d'air.

Des tests identiques ont été conduits pour le fonctionnement du système à débit élevé. Les résultats sont fournis dans l'article.

### 2.5.1.3 Rupture de courroie

La rupture de la courroie d'un ventilateur est un défaut courant, créant un arrêt du débit circulant dans la conduite concernée comme cela pourrait arriver dans le cas d'une panne de ventilateur.

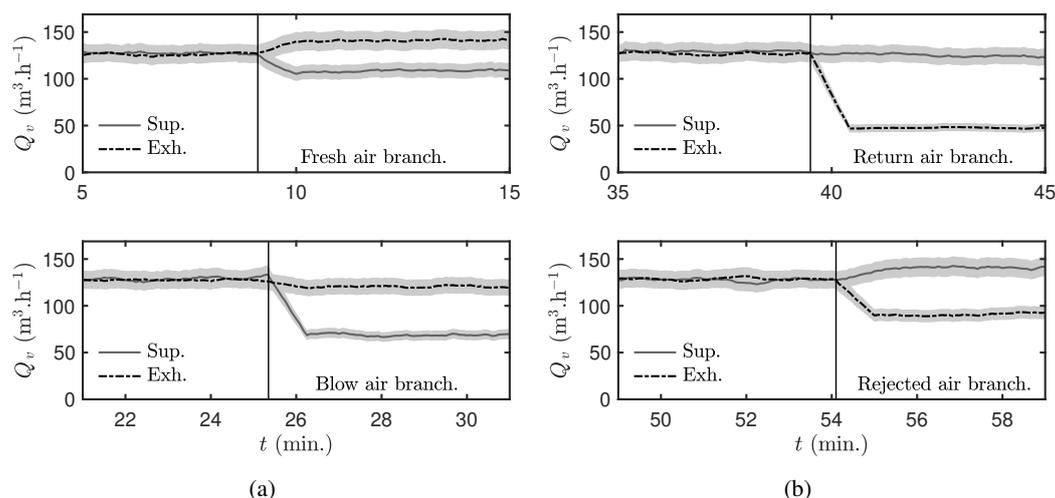


Figure 2.10 – Données expérimentales pour l'obstruction des conduites de soufflage (a) et d'extraction (b) en faible débit.

En revanche, lors d'une rupture de courroie le moteur électrique du ventilateur continue à fonctionner, consommant alors de l'énergie. Bien que le rotor continue à tourner, il ne fournit aucun couple à la volute et aucun débit n'est donc généré dans la gaine.

Un jeu de données expérimentales est ici fourni pour chacun des deux ventilateurs et pour les deux vitesses de fonctionnement. Encore une fois, dans un souci de compacité, seuls les cas en grande vitesse sont présentés dans cette section, les autres étant proposés dans l'article.

Dans la Figure 2.11 la rupture de la courroie du ventilateur de soufflage apparaît à  $t = 42$  min. Le débit de soufflage s'effondre pendant que le débit d'air extrait continue à un niveau nominal. Ce qui a pour conséquence, que l'efficacité de l'échangeur chute à zéro, car l'Eq. (2.2) dépend du débit d'air. Il peut être noté que la puissance d'alimentation des ventilateurs reste quasiment constante durant toute la durée du test, indiquant que les moteurs tournent encore. Cela simule donc bien la rupture d'une courroie. La Figure 2.11(b) présente l'évolution des températures durant le test. La température d'air de soufflage et de rejet (influencées par les transferts thermiques de l'échangeur) voient leur régime changer après l'arrêt du débit.

Le cas suivant est la rupture de courroie du ventilateur d'extraction en grande vitesse. Les données générées expérimentalement sont présentées dans les Figures 2.11(a) et 2.11(b). Le débit chute dans la conduite d'extraction entraînant une fois encore une perte d'efficacité du système d'économie d'énergie. Pendant ce temps, les deux ventilateurs continuent d'être alimentés de façon nominale. Comme pour le cas précédent, les régimes des températures d'air se trouvent modifiés à la suite de l'arrêt d'une partie de la ventilation.

#### 2.5.1.4 Encrassement des filtres

**Ete** Dans cette étude il est présenté l'impact de l'encrassement des filtres sur les débits d'air fournis et sur l'efficacité de l'échangeur à plaques. Chacun des deux filtres présents dans ce système, sur la conduite de soufflage et d'extraction, ont été obstrués séparément dans des tests spécifiques. Le cas présenté dans cette section concerne le bouchage du filtre M5 présent sur la gaine de soufflage. Le cas portant sur l'obstruction du filtre de la conduite d'extraction est donné dans l'article [78].

La Figure 2.13 présente les variations de débits et d'efficacité dues à trois différents cas d'obstruction du filtre d'air neuf. Il peut être remarqué sur la Figure 2.13(a) que le débit d'air insufflé décroît avec l'augmentation de l'encrassement du filtre. Ce débit est de  $124.6 \pm 2\% \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  pour le cas d'un filtre neuf (*i.e.* non obstrué) à  $118.8 \pm 2\% \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  pour le cas d'un filtre obstrué à 80%.

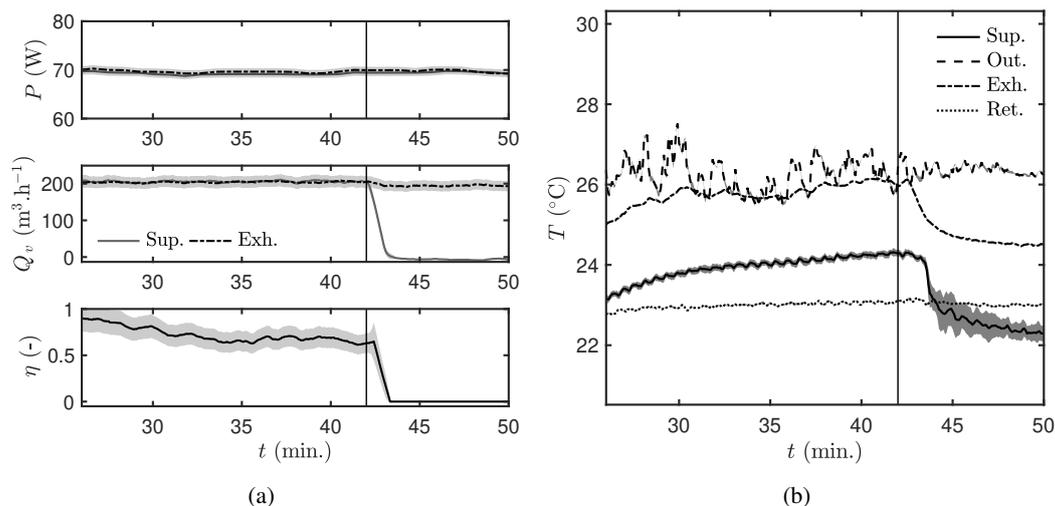


Figure 2.11 – Données expérimentales pour la rupture de la courroie du ventilateur de soufflage à grand débit.

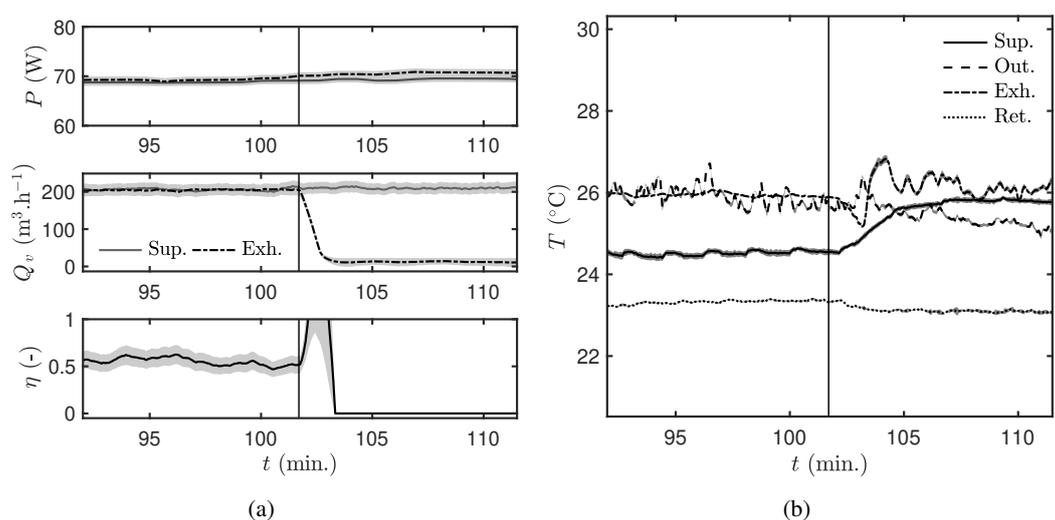


Figure 2.12 – Données expérimentales pour la rupture de la courroie du ventilateur d'extraction à grand débit.

Cela correspond à une diminution de 5% du débit nominal initial. En plus, de l'encrassement des filtres, ce cas crée un déséquilibre des débits d'air dans les gaines. Cela peut induire des circulations d'air non souhaitées dans les pièces du bâtiment et des consommations énergétiques accrues des ventilateurs. Une conséquence de cette chute de débit due à l'encrassement du filtre est la décroissance significative de l'efficacité de l'échangeur, comme remarqué sur la Figure 2.13(b). Une diminution de 25% de l'efficacité peut être observée pour une obstruction de 80%.

Les Figures 2.14(a) et 2.14(b) présentent les évolutions des débits et efficacités moyennés sur le test en fonction du pourcentage d'obstruction du filtre. En faisant correspondre un modèle empirique aux données expérimentales générées, on trouve qu'une augmentation de 10% de l'obstruction du filtre entraîne une réduction de 2.5% de l'efficacité. La Figure 2.14(a) révèle également que la valeur réglementaire minimale de renouvellement d'air n'est plus respectée pour un encrassement supérieur à 60%. Ainsi un problème sanitaire se pose en plus du défaut initial, lorsque la valeur de 120 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> n'est plus respectée.

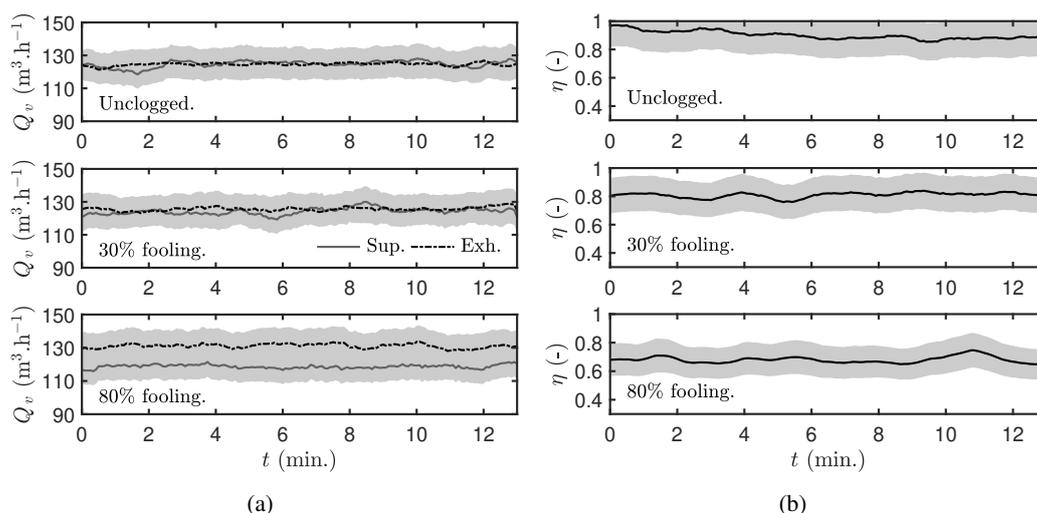


Figure 2.13 – Données expérimentales pour l'encrassement du filtre sur la conduite de soufflage.

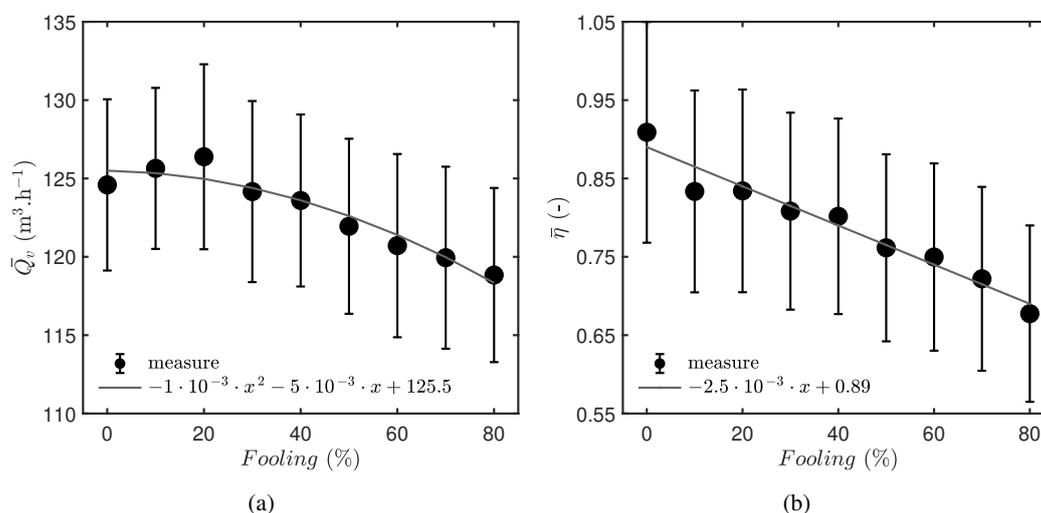


Figure 2.14 – Évolution des débits sur la gaine de soufflage (a) et de l'efficacité de l'échangeur (b) en fonction de l'encrassement.

**Hiver** Ce défaut est présenté une seconde fois car lors de génération d'hiver, un second protocole expérimental a été mis en œuvre. En plus du protocole d'encrassement effectué lors des tests précédent, un nouveaux protocole a été développé afin permettre d'identifier approximativement les durées d'encrassement équivalentes aux surfaces obstruées. Ce second protocole est développé en Annexe. On retrouve dans la Figure 2.15 l'évolution temporelle des débits et des efficacités obtenue lors des tests générés. La Figure 2.15(a) présente l'évolution des débits pour trois tests effectués avec des surfaces de filtre obstruées différentes. Dans le cas du filtre non-obstrué, il est constaté que le débit d'extraction est légèrement supérieur au débit d'insufflation. Le cas avec 30% de surface obstruée modifie cet état car c'est désormais le débit de soufflage qui se retrouve légèrement au dessus du débit d'air extrait. Pour le dernier cas généré, à 80% de la surface du filtre recouverte, on constate que les débits ne sont plus équilibrés de plus de  $10\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . La Figure 2.15(b) présente l'évolution des efficacités pendant ces tests, aucune évolution significative n'est constatée.

Les Figures 2.14(a) et 2.14(b) présentent les évolutions des débits et efficacités moyennés sur le test en fonction du pourcentage d'obstruction du filtre. Les points rouges correspondent aux

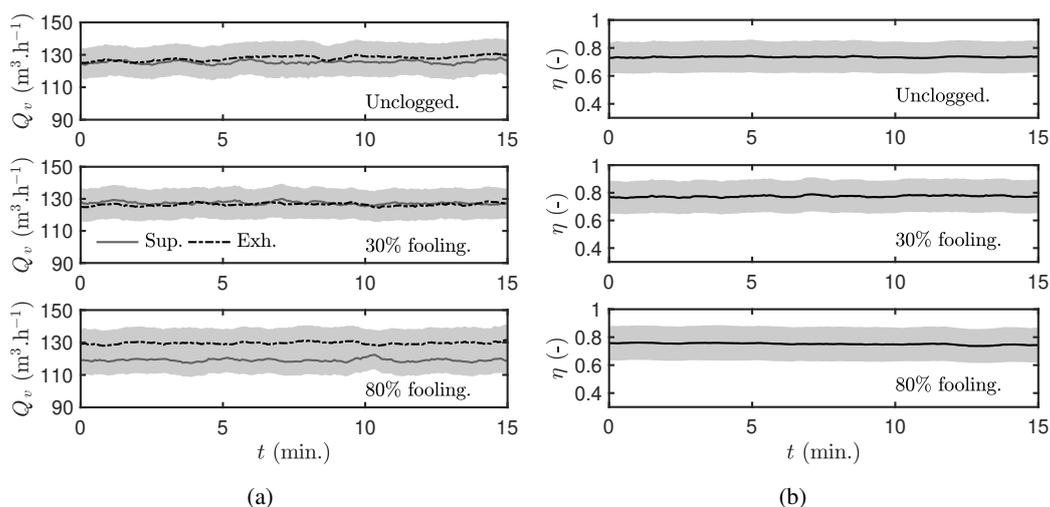


Figure 2.15 – Données expérimentales pour l'encrassement du filtre sur la conduite de soufflage.

valeurs obtenues avec le protocole d'encrassement aux particules fines. Ces points ont été placés sur la courbe afin de montrer que les conséquences d'un encrassement homogène particulière, représentatif d'un encrassement *naturel* induit les mêmes conséquences que le protocole simplifié d'obstruction du filtre. La Figure 2.16(a), présente ces résultats. On constate que leurs incertitudes sont dans le même ordre de grandeur. En revanche seulement trois points ont été générés via ce protocole. En effet, cette méthode est relativement longue à mettre en place, bien qu'elle soit beaucoup plus rapide que l'encrassement naturel. La Figure 2.16(b) présente les évolutions de rendement obtenues avec les deux protocoles. Ces rendements ne varient pas significativement, et ces derniers semblent inférieurs avec le second protocole.

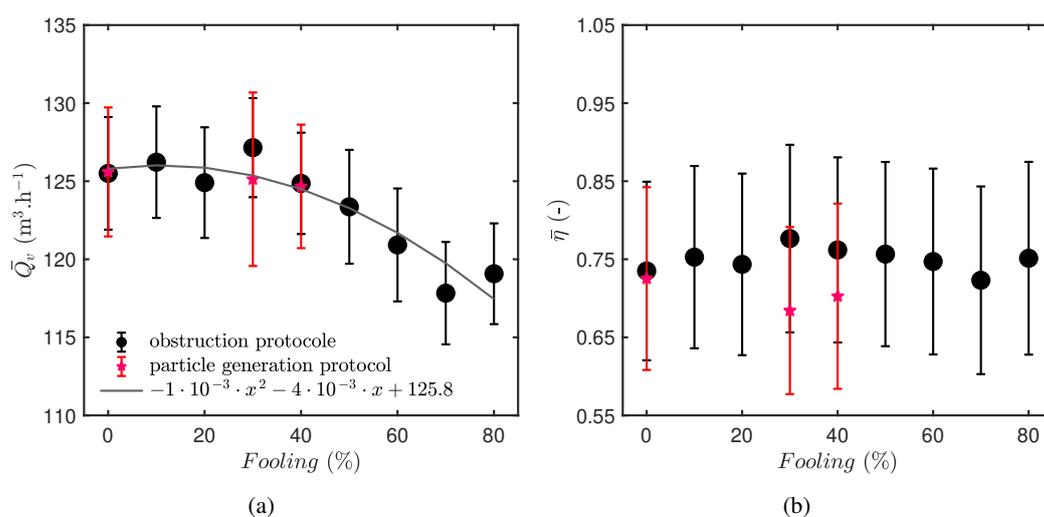


Figure 2.16 – Évolution des débits sur la gaine de soufflage (a) et de l'efficacité de l'échangeur (b) en fonction de l'encrassement.

## 2.5.2 Les données d'été

### 2.5.2.1 Fonctionnement nominal

Dans ce jeu, les deux ventilateurs fonctionnent de façon continue et l'évolution de la température qui est observée résulte du fonctionnement nominal du système dans les conditions étudiées. La Figure 2.17(a) montre la puissance fournie aux ventilateurs de soufflage et d'extraction. On observe que les deux ventilateurs sont bien alimentés de façon continue, avec des valeurs de puissance similaire, durant l'intégralité de la durée du test. La Figure 2.17(a) présente également la chute de pression ayant lieu de part et d'autre des iris de mesure, ainsi que les débits de soufflage et d'extraction calculés via ces mesures. Cela illustre bien que les flux d'air circulent normalement dans les canalisations et que les conduites sont bien équilibrées. En effet, les débits d'air moyen de soufflage et d'extraction durant le test sont égaux à respectivement  $124.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et  $125.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . La différence de débit d'air entre les deux branches est donc inférieure à 1%, ce qui est nettement inférieur à la précision d'équilibrage des réseaux trouvée en pratique (de l'ordre de 10% en volume). La Figure 2.17(b) présente les quatre températures importantes à relever durant la saison d'été : la température extérieure; de soufflage, de reprise et extraite, respectivement notées  $T_{Out}$ ,  $T_{Sup}$ ,  $T_{Ret}$  et  $T_{Exh}$ . Il peut être facilement vérifié que le système fonctionne en saison estivale grâce à la valeur de la température extérieure autour de  $38^\circ\text{C}$ . Le fonctionnement du système est donc bien en régime établi et en fonctionnement nominal, car la température extérieure diminue jusqu'à la température de soufflage dans l'échangeur grâce à la température d'air intérieure. L'efficacité de l'échangeur de chaleur est donnée en Figure 2.17(c) et se situe aux alentours de 75%. Des données supplémentaires, fournies dans l'article [78], ont également été générées pour le fonctionnement des ventilateurs en grande vitesse.

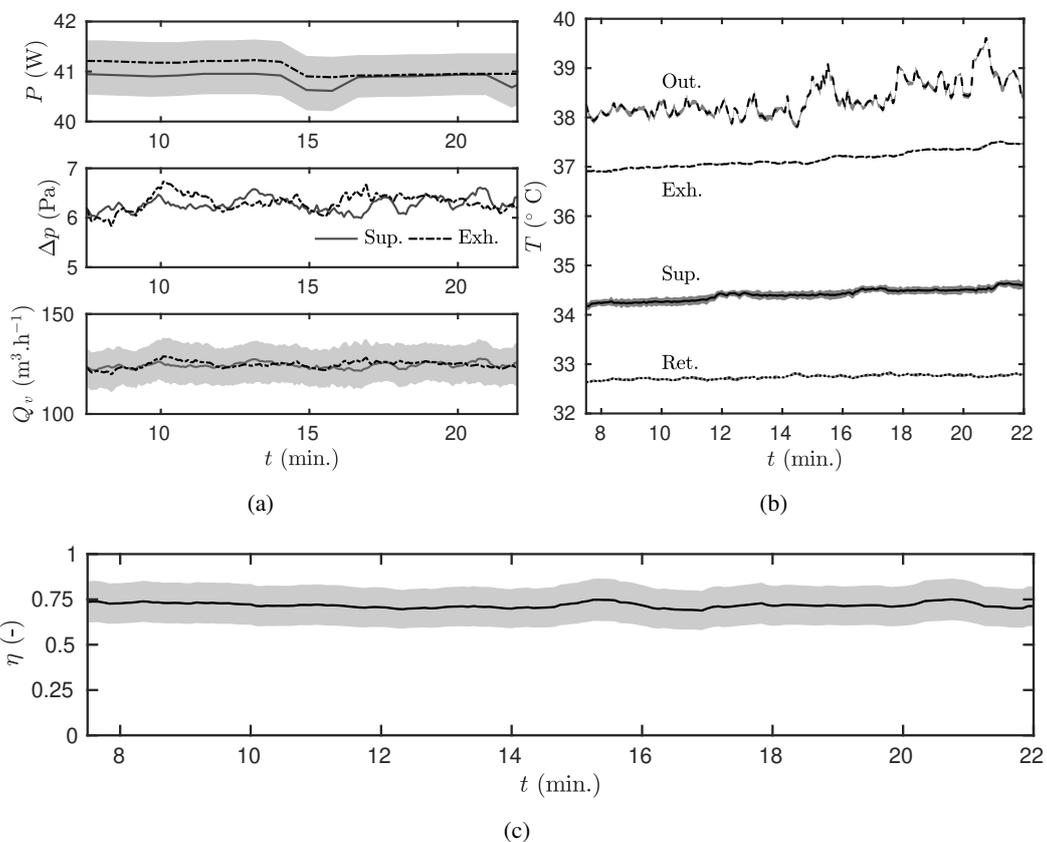


Figure 2.17 – Données expérimentales pour le fonctionnement nominal du système en petite vitesse.

### 2.5.2.2 Fonctionnement nominal du Bypass

Dans cette section sont présentés les jeux de données concernant les fonctionnements usuels du bypass, pour le petit et grand débit.

Tout d'abord le fonctionnement normal du bypass lors du régime avec le débit maximal est étudié. La Figure 2.18(a) présente la puissance consommée par le volet du bypass. On constate que les deux ventilateurs fonctionnent correctement, en étant alimentés par la puissance maximale durant l'intégralité du test. A  $t = 15$  min, le volet reçoit une impulsion et change de position, forçant le débit à bypasser l'échangeur. On notera que les débits sont toujours bien équilibrés dans les conduites aux alentours de  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . La Figure 2.18(b) reporte l'évolution des températures d'air relevées dans les différents points du système. La température de retour, correspondant à la température intérieure est relativement élevée, supérieure à  $25.2^\circ\text{C}$ . Cette température est également supérieure à la température extérieure qui avoisine les  $21^\circ\text{C}$ . Ces conditions sont donc favorables à la mise en place de *free cooling*. Le bypass est alors alimenté à  $t = 15$  min. La conséquence est que l'échangeur de chaleur n'est plus alimenté en air par la conduite d'air neuf. La température de soufflage mesurée perd donc presque instantanément  $1^\circ\text{C}$ . Réciproquement, le phénomène inverse peut être observé sur la conduite d'air extrait. Comme le montre la Figure 2.3, la prise de mesure de la température de retour d'air est en amont de celle de la température de rejet. Ces deux points sont séparés par l'échangeur de chaleur. Ainsi de la même façon le fait que la température de rejet se rapproche de la température de retour indique que moins d'énergie est transférée dans l'échangeur. La Figure 2.18(a) présente la quantité d'énergie échangée par le système d'économie d'énergie. L'évolution confirme bien qu'il y a moins de chaleur récupérée dans l'échangeur à la suite de l'ouverture du bypass. En revanche cette action n'a pas d'effet directement appréciable sur la température de l'air intérieur du fait du volume de la pièce.

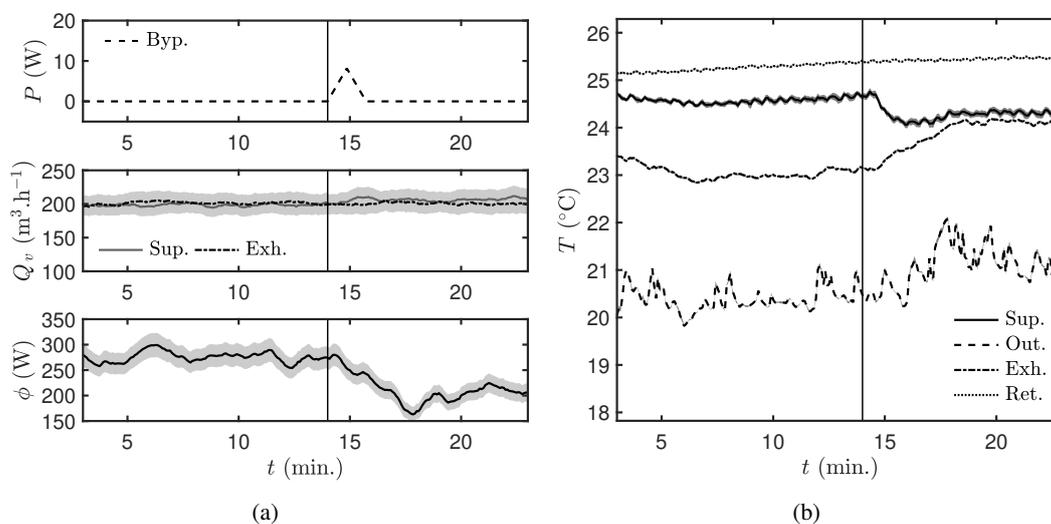


Figure 2.18 – Données expérimentales pour le fonctionnement nominal du bypass en grand débit.

Le second jeu de données fourni dans cette section concerne celles du fonctionnement nominal du bypass lors d'un fonctionnement en petite vitesse. Ces données sont présentées dans la Figure 2.19. La Figure 2.19(a) confirme que le bypass a bien été activé et que les débits d'air ont été augmentés. Les débits étant passés à la valeur maximale, la consommation des ventilateurs a également augmenté. L'évolution des températures, visible sur la Figure 2.19(b) permet des observations très similaires à celles faites pour le cas en grande vitesse. La température d'air intérieur est plus élevée que l'extérieur durant tout le test. C'est donc un cas favorable à la mise en place de *free cooling*. Lorsque le bypass est ouvert, des changements peuvent être observés sur les températures de soufflage et de rejet. La première tend vers la température extérieure et la seconde

vers la température d'air intérieur. Théoriquement sur un temps suffisamment long, la température de soufflage devrait converger vers la température extérieure et la température de rejet vers la température intérieure. Ces évolutions sont dues à la diminution d'échange de chaleur résultant de l'ouverture du bypass. Pour mettre en évidence cette perte d'échange de chaleur, la Figure 2.19(a) présente la différence de température entre la température de soufflage et la température extérieure. Il y a une chute de température d'environ  $1^{\circ}\text{C}$  entre les deux états.

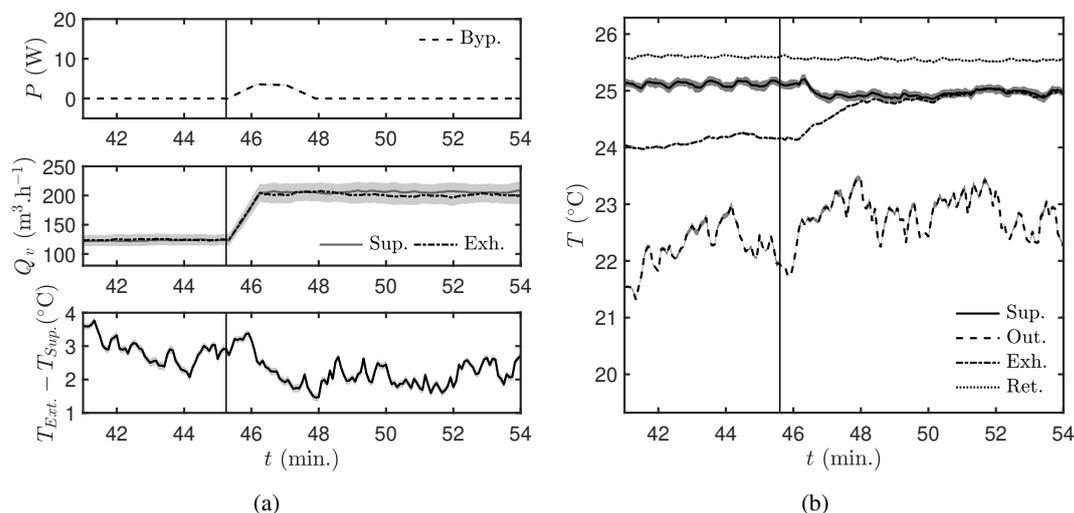


Figure 2.19 – Données expérimentales pour le fonctionnement nominal du bypass en petit débit.

### 2.5.2.3 Défaut du Bypass

Après avoir présenté les fonctionnements nominaux du bypass, les données concernant les fonctionnements défectueux sont présentées. Trois des six défauts concernant le bypass sont présentés dans les sections suivantes. Deux pour la grande vitesse des ventilateurs et un pour la petite. Les autres données sont fournies dans l'article [78].

**Défaut du bypass à grande vitesse initiale** Trois défauts concernant le bypass peuvent se produire lors d'un fonctionnement à grand débit. Le premier est que le bypass ne s'active simplement pas. Ce jeu de données est présenté sur la Figure 2.20. La Figure 2.20(a) montre que les puissances des ventilateurs sont constantes et égales à la valeur maximale. Le volet du bypass quant à lui n'est pas activé durant le test. La valeur de la puissance consommée par le bypass reste nulle, ce qui illustre le défaut du système. Les débits d'air circulant dans les deux conduites principales sont constants et bien équilibrés comme cela peut être constaté sur la Figure 2.20(a). L'évolution des températures est consignée dans la Figure 2.20(b). Il est clair qu'il existe un potentiel pour la *free cooling* et qu'il n'est pas utilisé. La température extérieure est inférieure de plus de  $5^{\circ}\text{C}$  à la température de retour correspondant à la température dans la pièce. Dans ces conditions le bypass devrait être activé afin de permettre le rafraîchissement de la pièce. La Figure 2.20(a) présente le gain de chaleur obtenu dans la conduite grâce à l'échangeur. Il peut être constaté qu'il demeure constant durant le test aux alentours de 250 W. Cela illustre bien la présence d'un défaut par comparaison à l'évolution attendue lors de l'activation du bypass dans la Figure 2.18. Ainsi le *ground truth* dans ce jeu de données est clair et indiscutable.

Un second comportement défectueux du bypass apparaît lorsque ce dernier est bien activé mais que le débit est réduit. Comme cela peut être remarqué dans la Figure 2.21(a) le bypass reçoit bien une impulsion pour changer d'état à  $t = 40$  min. Au même moment les débits d'air dans les conduites décroissent jusqu'à atteindre les débits minimaux. En même temps les puissances d'ali-

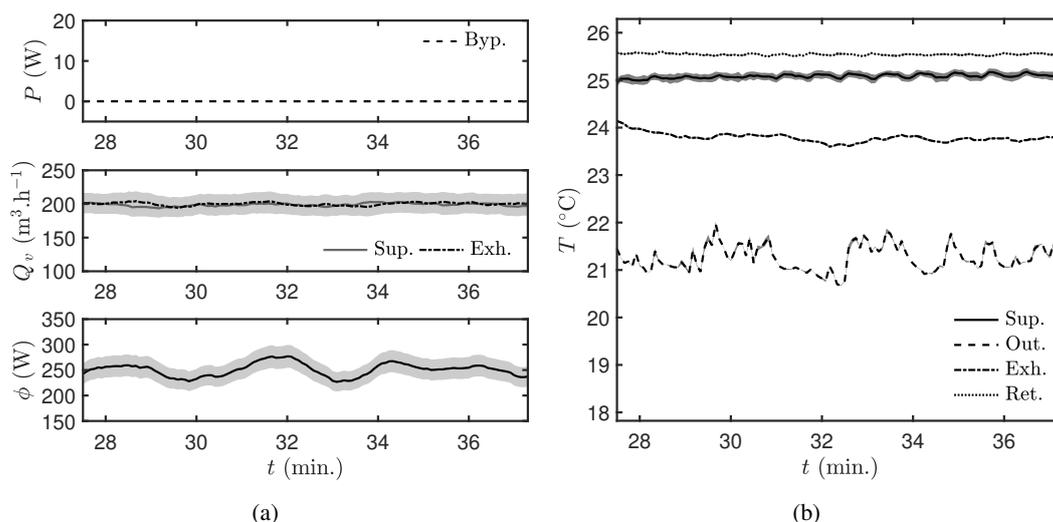


Figure 2.20 – Données expérimentales du défaut du bypass en grand débit : non-activation du volet et débit constant.

mentation diminuent également. L'évolution des températures est présentée sur la Figure 2.21(b) et indique la présence d'une situation favorable au *free cooling*. Néanmoins, à cause du défaut (*i.e.* la diminution des débits d'air) moins d'air est introduit dans le bâtiment, réduisant la vitesse de déchargement des calories. Bien que le bypass soit ouvert le potentiel de déchargement offert par la situation est bridé. Il peut être constaté une évolution des températures plus progressive que dans les cas à vitesse constante. Ce défaut peut être plus complexe à mettre en évidence avec seulement un indicateur basé sur le résultat comme la puissance échangée.

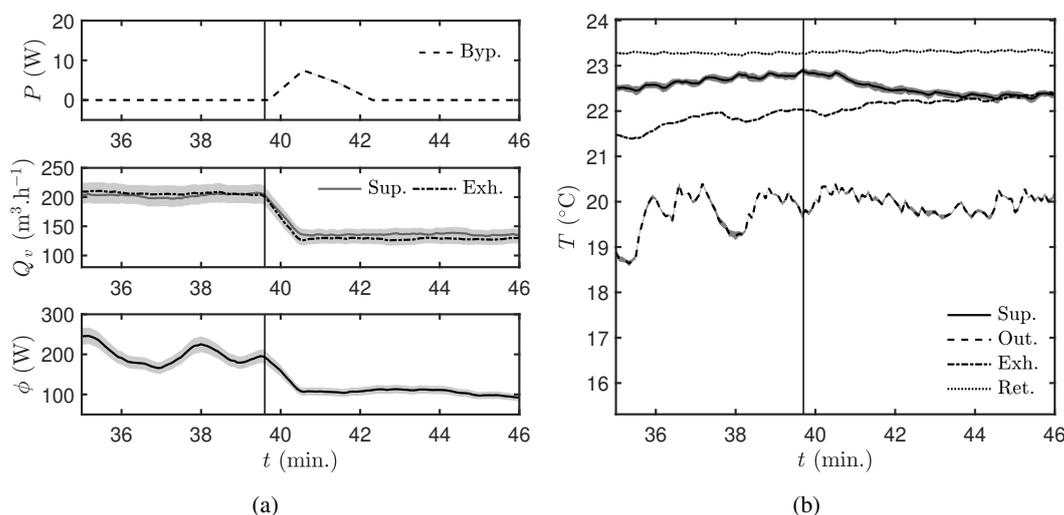


Figure 2.21 – Données expérimentales du défaut du bypass en grand débit : activation du volet et débit décroissant.

Le dernier cas de défaut du bypass en grande vitesse correspond au cas où le bypass n'est pas activé et que le débit est réduit. Dans un souci de compacité du manuscrit ce dernier est seulement disponible dans l'article.

**Défaut du bypass à petite vitesse initiale** Des défauts d'activation du bypass peuvent aussi se produire lors du fonctionnement du système à petite vitesse. Comme pour le fonctionnement en grande vitesse trois défauts sont possibles. Un seul cas sera présenté, les autres sont disponibles dans l'article [78].

Le défaut présenté dans cette section apparaît lorsque le volet d'air ne s'active pas et que les débits d'air restent à un niveau minimal. La Figure 2.22(a) permet de vérifier que le volet du bypass n'est pas activé durant tout le test. Il peut être constaté que les débits ne varient pas durant toute la durée du jeu, ce qui induit que les puissances consommées par les ventilateurs restent constantes. L'analyse de l'évolution des températures permise par la Figure 2.22(b) montre la présence de conditions favorables à du *free cooling*. Il n'y a aucune présence de modification comportementale dans la dynamique des températures. La Figure 2.22(a) présente également l'évolution temporelle de l'efficacité de l'échangeur. Elle reste constante dans des conditions stationnaires durant ce test.

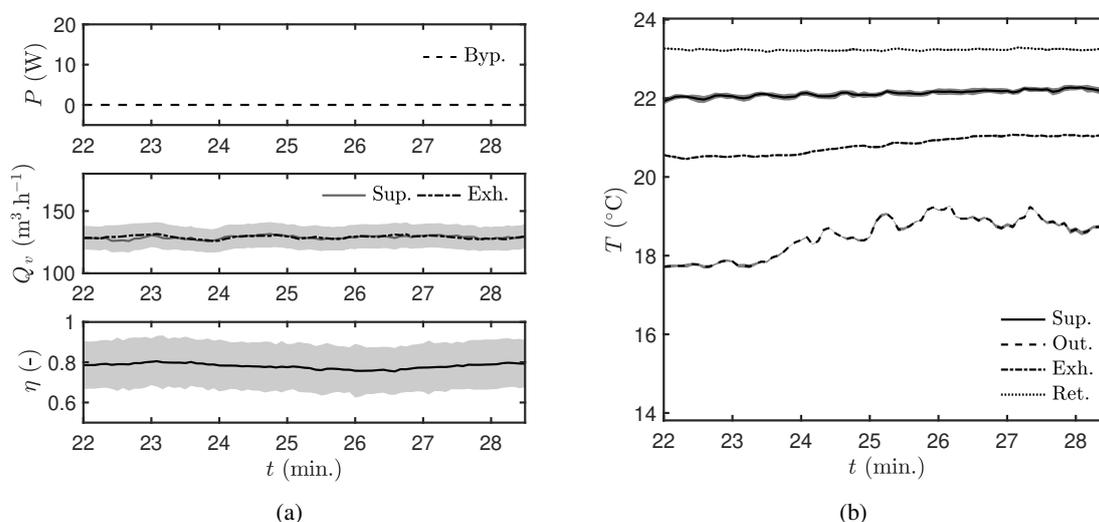


Figure 2.22 – Données expérimentales du défaut du bypass en petit débit : non-activation du volet et débit constant.

#### 2.5.2.4 Échec de l'activation du bypass

Le dernier jeu de données de la saison estivale concerne l'obstruction du volet d'air du bypass. Ce défaut est généré lors d'une situation favorable à la mise en place de *free cooling* pour des fonctionnements en grande et en petite vitesse. Seul le cas se référant au fonctionnement à débit maximal sera présenté dans cette section, l'autre cas est disponible dans l'article [78]. La Figure 2.23(a) montre que les débits sont bien maintenus à leur niveau maximal même après l'activation du bypass. Le volet d'air du bypass reçoit une impulsion à  $t = 31$  min du fait de l'existence d'un potentiel pour rafraîchissement. Ce dernier étant mécaniquement bloqué il ne peut pas s'ouvrir et permettre à l'air d'éviter l'échangeur. Il peut être remarqué que comme le volet ne peut pas atteindre le contacteur d'ouverture, il continue à avoir une légère consommation électrique. L'efficacité de l'échangeur reste bien constante du fait du blocage du bypass. La Figure 2.23(b) montre que l'évolution des températures durant le test n'est pas perturbée et reste bien en régime établi.

### 2.5.3 Les données d'hiver

Dans cette section nous présentons uniquement les cas des défauts d'hiver et pas des défauts globaux. Tous les défauts générés sont disponibles dans l'article [78].

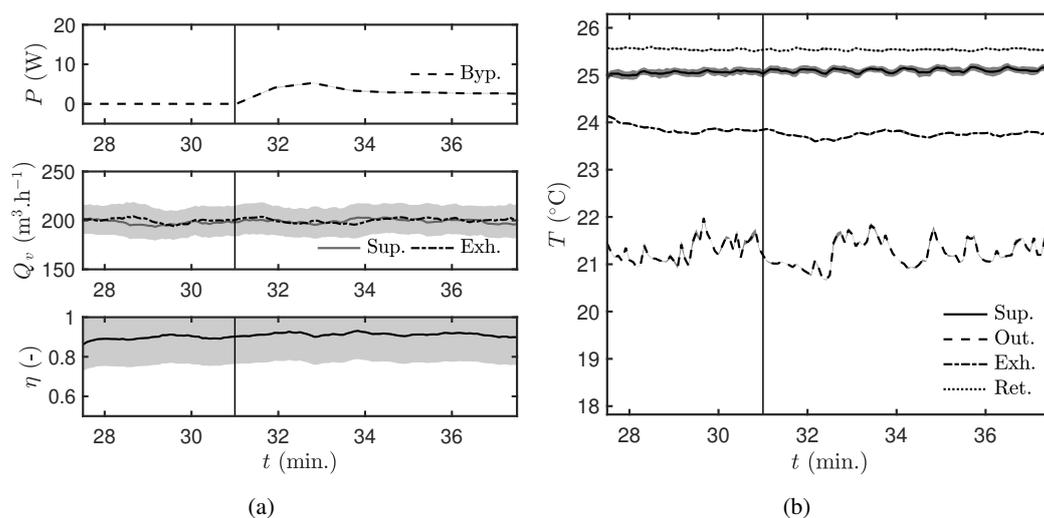


Figure 2.23 – Données expérimentales pour l'obstruction du volet du bypass à grande vitesse.

### 2.5.3.1 Fonctionnement nominal

Concernant les fonctionnements nominaux hivernaux il en existe, comme pour la saison d'été, pour le régime en petit et en grand débit. En revanche, il y a deux situations supplémentaires en fonction du fonctionnement ou non de la batterie antigel. Lorsque la température extérieure est inférieure à  $5^{\circ}\text{C}$  la batterie antigel doit se mettre en marche afin d'éviter des problèmes de condensation puis de gel dans l'échangeur. Ainsi des jeux de données avec et sans fonctionnement de la batterie antigel doivent être générés pour chacun des cas.

**Sans antigel** Le cas en fonctionnement nominal sans allumage de la batterie antigel, est présenté dans la Figure 2.24. Les ventilateurs sont alimentés de façon constante et continue durant tout le test. La Figure 2.24(a) montre également que les débits engendrés sont constants, équilibrés et conformes aux attentes réglementaires. Les puissances consommées par les batteries sont également en régime stationnaire. La puissance de la batterie antigel est quasi-nulle (aux alentours de 2.5W) car cette dernière est alimentée mais ne fonctionne pas. La batterie de soufflage consomme environ 500W de façon constante durant l'intégralité du test. La Figure 2.24(b) présente l'évolution des températures d'air. On constate qu'elles sont constantes révélant un régime stationnaire. Durant ce test, la température extérieure est particulièrement constante, ce qui explique que les températures à la sortie de l'échangeur et rejetée soient si stables. La puissance quasi constante fournie à la batterie de soufflage est aussi expliquée par l'arrivée d'un air à température stable. De plus, la température extérieure reste supérieure à la température minimale souhaitée dans les gaines de  $5^{\circ}\text{C}$  déclenchant l'allumage de la batterie antigel. La Figure 2.24(c) montre que l'efficacité de l'échangeur de chaleur durant le test constant à environ 75%. Il est clair que dans ce jeu de données, le système fonctionne bien de façon nominale en régime établi.

**Avec antigel** Le second cas de fonctionnement nominal du système concerne les périodes où la température extérieure est inférieure à  $5^{\circ}\text{C}$  et où la batterie antigel est en fonctionnement. Les données générées de ce test sont présentées dans la Figure 2.25. Une fois encore les puissances des batteries comme les débits sont conformes aux attentes et constants durant toute la durée du test. La Figure 2.25(a) permet de constater que les batteries consomment bien de l'énergie. La puissance moyenne consommée par la batterie antigel se situe à environ 150W et 550W pour la batterie de soufflage. La température d'air préchauffé par la batterie antigel oscille bien autour de  $5^{\circ}\text{C}$  de consigne comme le montre la Figure 2.25(b). Il peut également être constaté que le régime

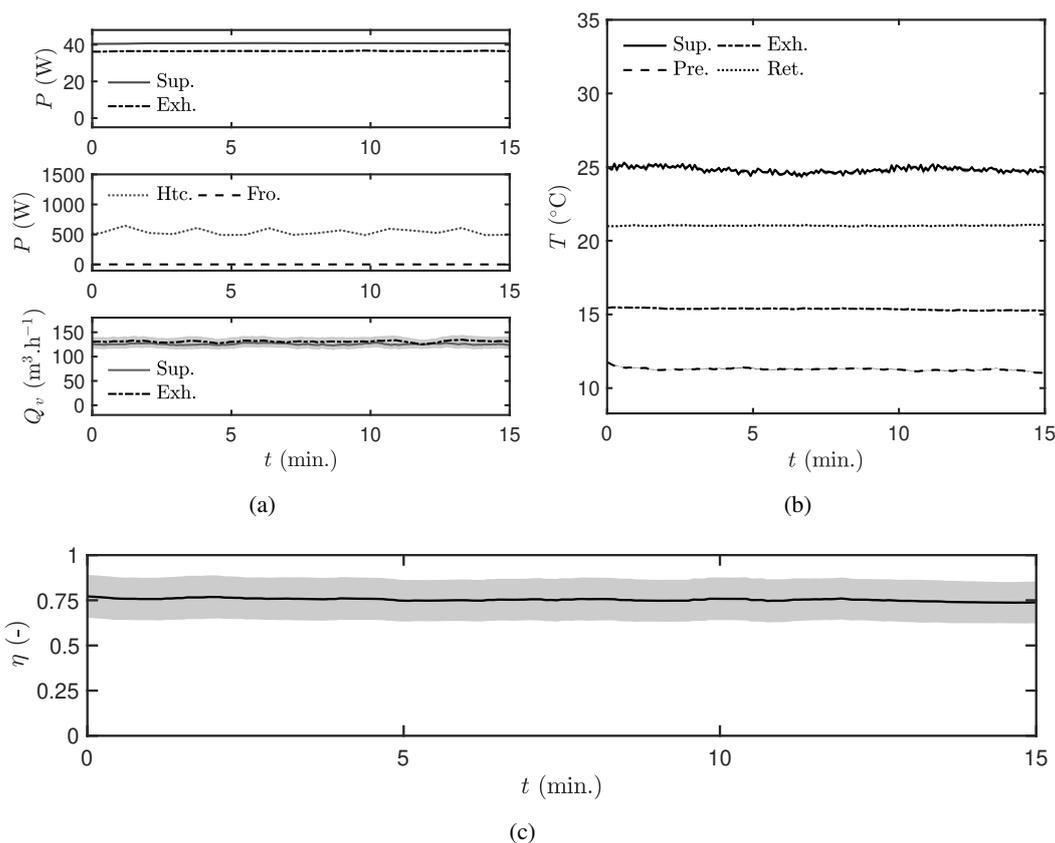


Figure 2.24 – Données expérimentales en fonctionnement nominal sans batterie antigel à petite vitesse.

des températures est bien établi. La Figure 2.25(c) présente l'efficacité de l'échangeur durant le test, qui se maintient à environ 60%. On constate encore une fois que le système fonctionne en régime nominal.

Les jeux de données en fonctionnement nominal hivernal servent de *ground truth* pour l'apparition des défauts. En comparant les données et comportements du système dans les cas défectueux, à ceux des fonctionnements corrects, les défauts pourront être unanimement acceptés. Des jeux identiques ont également été générés pour les fonctionnements du système en grande vitesse du ventilateur, qui sont disponibles dans l'article [78].

### 2.5.3.2 Défaut de régulation de la batterie antigel

Le premier défaut présenté dans cette section est celui du réglage du régulateur PID de la batterie antigel. Un premier cas appelé *cas de fonctionnement pseudo-nominal* est introduit ici. Il est présenté pour un fonctionnement en petit débit sur la Figure 2.26. Ce cas est qualifié de pseudo-nominal car, ce défaut a été couplé à quasiment tous les autres défauts. C'est donc bien un défaut, comparativement aux cas nominaux présentés ci-dessus, mais il peut également être utilisé comme cas de référence de base (pseudo-nominal) pour les défauts couplés. La Figure 2.26(a), présente l'évolution temporelle des puissances des ventilateurs, des batteries et des débits dans les gaines. Il est à noter que les puissances utilisées par les ventilateurs, ainsi que les débits fournis, sont constants durant tout le test. La puissance absorbée par la batterie de soufflage est relativement constante également. En revanche, la puissance de la batterie antigel est chaotique, effectuant des oscillations entre 2.5W et 1000W. La Figure 2.26(b) permet également de constater que la

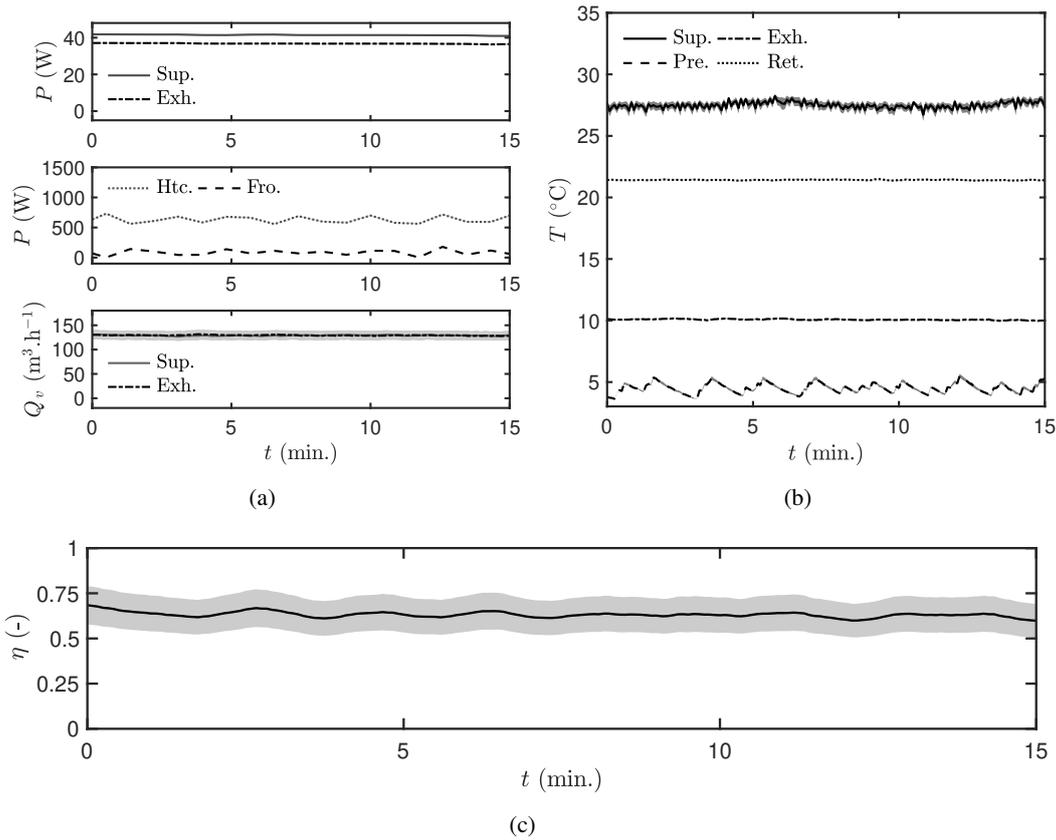


Figure 2.25 – Données expérimentales en fonctionnement nominal avec batterie antigel à petite vitesse.

température d'air préchauffé n'est pas du tout constante. Bien que la batterie s'allume lorsque la température dans la gaine passe sous les  $5^\circ\text{C}$ , celle-ci ne se stabilise pas à la consigne. Il est relevé que la température de consigne de soufflage en revanche respecte bien la consigne de soufflage. L'efficacité de l'échangeur présentée sur la Figure 2.26(c) est impactée par ces variations de température et oscille entre 0 et 60%.

Ce jeu de données pourra également être utilisé en guise de *fonctionnement nominal sous la condition de défaut de réglage du PID*. Cela s'explique par le fait que le système se trouve dans un régime périodique stable et qu'il peut être couplé à d'autres défauts.

### 2.5.3.3 Panne batterie antigel

Les jeux présentés dans la section suivante concernent la panne de la batterie antigel. Quatre cas ont été générés, un cas dans lequel la batterie fonctionne de façon nominale et un autre où la batterie possède un problème de régulation et cela pour les deux débits différents.

**Panne de la batterie antigel lors d'un fonctionnement nominal** Dans ce cas, la batterie antigel tombe en panne lors d'un fonctionnement nominal où il y a nécessité de préchauffage de l'air extérieur. La Figure 2.27(a), permet de contrôler que les ventilateurs fonctionnent de façon nominale durant le test et que les débits sont constants et équilibrés. La puissance de la batterie de soufflage est constante durant tout le test. En revanche, la puissance de la batterie antigel est nominale jusqu'à  $t = 0$  min où elle s'arrête brusquement. L'analyse de la Figure 2.27(b) permet de corroborer ces constats. La température de soufflage est bien constante et la température intérieure à  $21^\circ\text{C}$ . La température de préchauffage est maintenue autour de  $5^\circ\text{C}$  jusqu'à  $t = 0$  min. Suite à

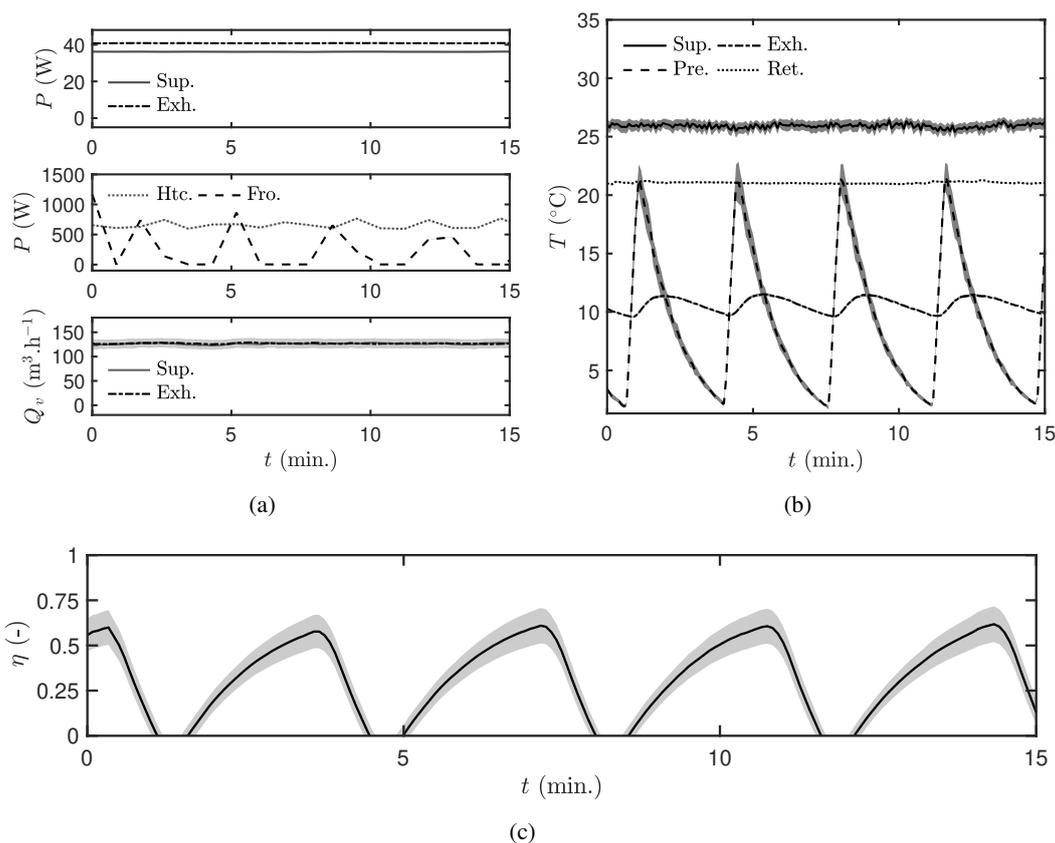


Figure 2.26 – Données expérimentales en fonctionnement pseudo-nominal avec batterie antigel mal régulée à petite vitesse.

la panne de la batterie, la température en aval de la batterie chute pour atteindre la température extérieure. La température minimale dans la gaine pour éviter la formation de condensation dans l'échangeur n'est plus respectée. La Figure 2.27(c) fournit le flux de chaleur délivré par la batterie antigel selon l'Eq.(2.3). Ce flux est stable jusqu'à la panne puis il décroît lentement à cause de l'inertie thermique de la batterie. Il est donc évident que la batterie n'émet plus une puissance suffisante pour maintenir la température arrivant de l'extérieur au dessus de  $5^{\circ}\text{C}$ .

**Panne de la batterie antigel lors d'un fonctionnement pseudo-nominal** Ce cas présenté dans la Figure 2.28 est le même défaut que le précédent mais survenant lors d'un fonctionnement avec régulateur de batterie antigel défaillant.

La Figure 2.28(a) présente les puissances consommées par les ventilateurs et les batteries ainsi que les débits circulant dans les conduites. L'analyse des puissances fournies aux ventilateurs et des débits traversant les gaines permet de dire que les ventilateurs fonctionnent correctement pendant le test. L'étude des données des batteries révèle deux choses. Dans un premier temps, pour  $t \leq 0$  min le système fonctionne en régime pseudo-nominal (i.e. dans les conditions de la Figure 2.26(a)). Dans un second temps, pour  $t \geq 0$  min, la batterie antigel n'est plus alimentée alors que la batterie de soufflage continue de fonctionner normalement. L'évolution des températures est donnée par la Figure 2.28(b). Le système évolue selon les conditions pseudo-nominales et après  $t = 0$  min la température préchauffée descend sous  $5^{\circ}\text{C}$ . La Figure 2.28(c) présente la puissance dissipée par la batterie dans l'air de la conduite de soufflage. Celle-ci suit les oscillations périodiques dues au problème de régulation, puis converge vers zéro après l'apparition de la panne.

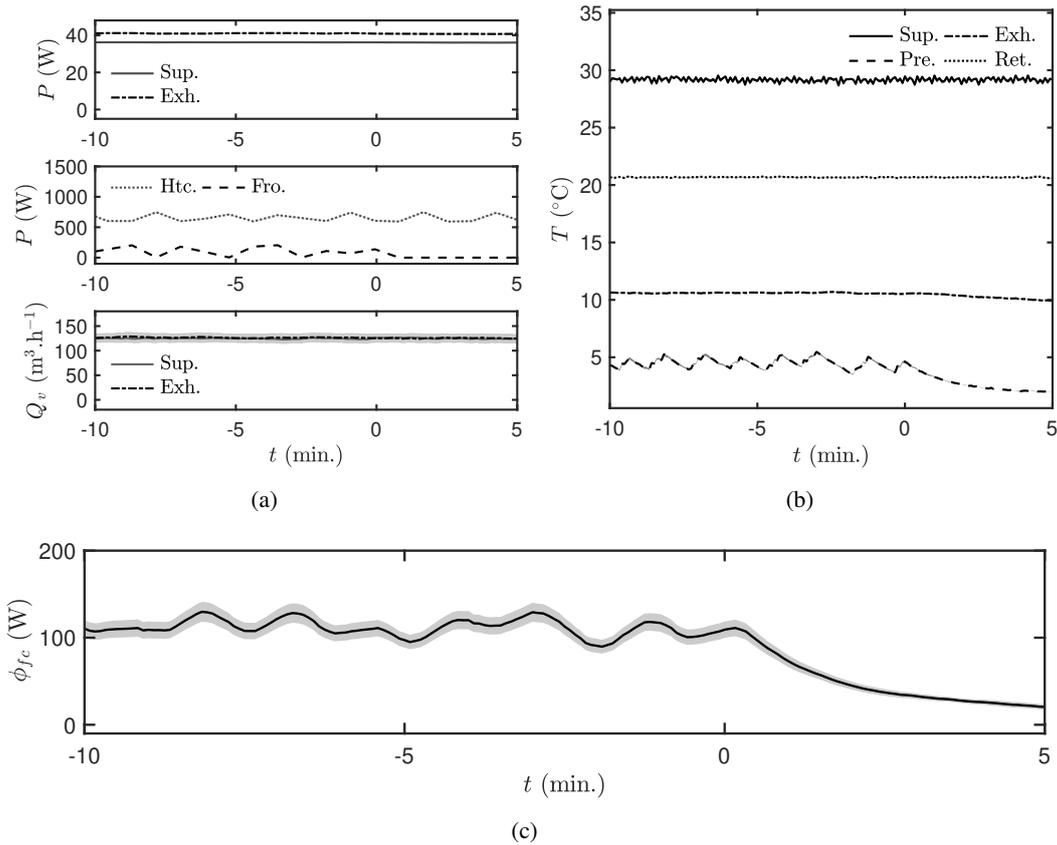


Figure 2.27 – Données expérimentales avec panne de la batterie antigel à petite vitesse.

### 2.5.3.4 Panne batterie appoint

Le défaut présenté dans cette section concerne la panne de la batterie de soufflage. Lors de ces tests, la batterie d'appoint se retrouve soudainement coupée alors que l'intégralité du reste du système fonctionne dans des conditions nominales.

**Panne de la batterie d'appoint lors d'un fonctionnement sans batterie antigel** La Figure 2.29(a) permet de vérifier le bon fonctionnement des ventilateurs et de l'équilibrage des débits. Durant ce test la batterie de soufflage fonctionne de façon nominale jusqu'à  $t = 0$  min. La batterie antigel ne délivre aucune puissance et bien que l'échelle ne permette pas ce constat, elle possède une consommation légèrement inférieure à 3W. L'évolution des températures est présentée dans la Figure 2.29(b). Elle permet de confirmer qu'il n'y a pas de besoin d'allumage de la batterie antigel car la température extérieure est à peine supérieure à 5°C, valeur minimale de consigne dans la gaine. La température de soufflage est constante jusqu'à  $t = 0$  min puis chute pour converger jusqu'à la température d'air à la sortie de l'échangeur. La figure 2.29(c) montre l'évolution temporelle du flux de chaleur généré par la batterie de soufflage. Ce dernier est constant durant la phase en fonctionnement nominal puis chute jusqu'à zero à l'apparition du défaut.

**Panne de la batterie d'appoint lors d'un fonctionnement avec batterie antigel** Dans ce jeu de données la batterie de soufflage tombe en panne durant un fonctionnement nominal. Cela peut être observé grâce à la Figure 2.30(a). Il est constaté que les ventilateurs sont alimentés correctement et que les débits sont constants et toujours équilibrés La batterie de soufflage est alimentée jusqu'à  $t = 0$  min, moment de l'apparition du défaut. La batterie antigel est alimentée durant tout le test. L'évolution des températures est présentée en Figure 2.30(b). La température de soufflage est

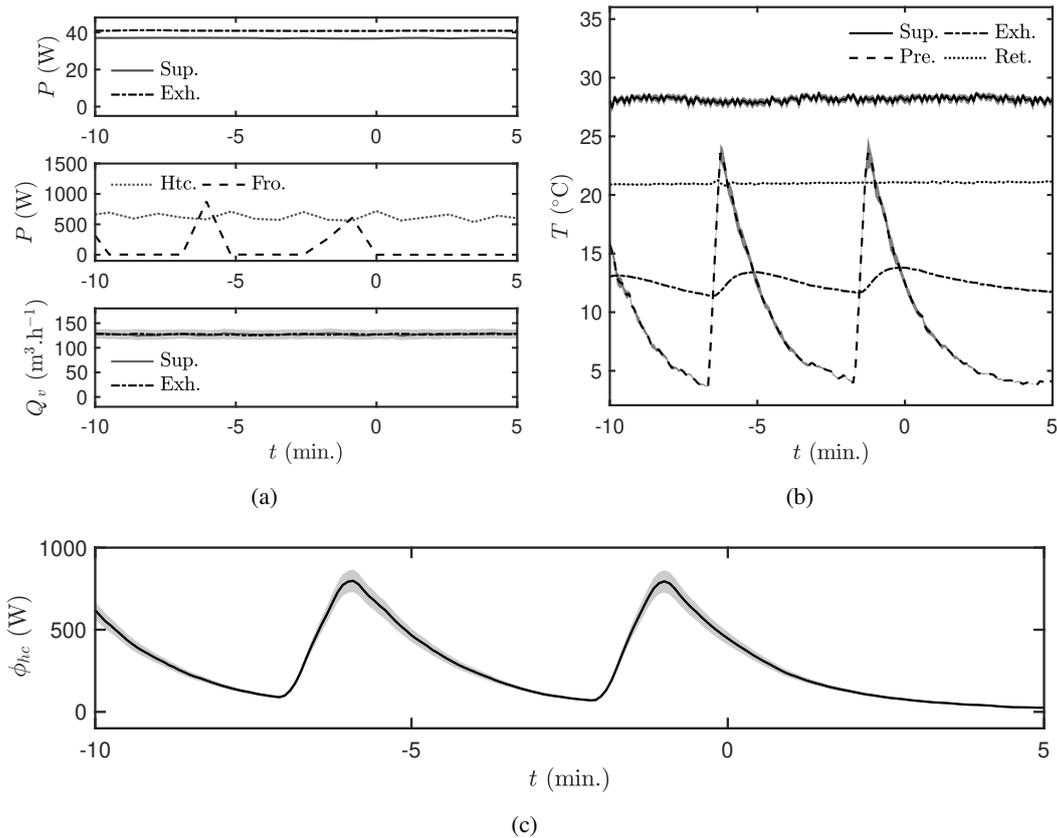


Figure 2.28 – Jeu de données expérimentales avec panne de la batterie antigel avec régulation défaillante à petite vitesse.

bien constante jusqu'à  $t = 0$  min, puis elle chute instantanément. La température extérieure est maintenue à environ  $5^{\circ}\text{C}$  par la batterie antigel. L'étude du flux de chaleur fourni par la batterie de soufflage, disponible en Figure 2.30(c), permet également de constater la panne.

## 2.6 Discussions

Avant de dresser quelques conclusions sur les données expérimentales qui ont été générées et présentées dans cette section, certaines remarques importantes sont mises en évidence.

Certaines Figures (e.g. 2.8(b) ou 2.11(b)) présentent des données d'évolution de températures sur lesquelles les incertitudes associées augmentent lors de la diminution du débit. Cette augmentation des incertitudes et donc de l'écart entre les deux thermocouples, est probablement due à une stratification thermique ou simplement à une répartition non-uniforme de la température dans la gaine. En effet le débit étant stoppé, l'air dans la gaine n'est plus correctement mélangé comme lorsque le fluide était en régime turbulent ( $\text{Re} \approx 21600$  pour le petit débit et une viscosité cinématique de l'air de  $\nu = 15.6 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Ainsi le fluide étant stagnant une stratification thermique peut apparaître, les binômes de thermocouples étant implantés sur une même section droite mais sur des plans différents (l'un horizontal et l'autre vertical), l'écart de mesure a augmenté à cause de l'écart de température. Toutefois l'écart type maximal de ces différences reste inférieur à  $0.3^{\circ}\text{C}$ .

Il peut être noté que le bypass de l'échangeur n'effectue pas complètement son rôle de court circuit de l'échange de chaleur. En effet, cela est dû à la construction du *bypass* de ce système. Il

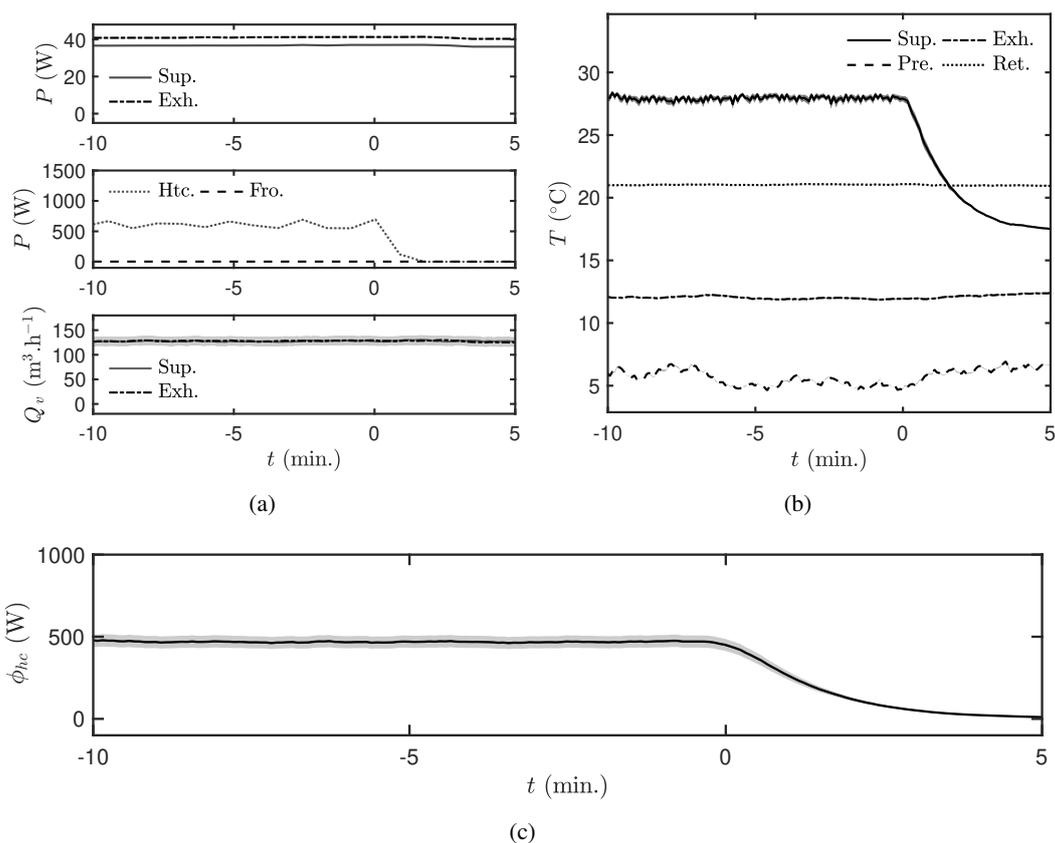


Figure 2.29 – Données expérimentales avec panne de la batterie d'appoint, sans fonctionnement de batterie antigel à petite vitesse.

est constitué d'un trappe au dessus de l'échangeur comme présenté sur la Figure 2.31. Cette trappe permet donc lors de son ouverture un passage préférentiel pour l'air, mais n'est pas un réel contournement complet de l'échangeur. Par exemple, dans la Figure 2.19(a) la température de soufflage est bien réduite après l'ouverture du bypass, mais elle reste différente de la température extérieure (d'environ 4 $^{\circ}\text{C}$ ). La différence restante est donc expliquée essentiellement par le réchauffement dans l'échangeur (considérant les pertes sensibles du ventilateur comme négligeables). Un phénomène équivalent peut également être constaté dans les Figures 2.19(b) ou 2.21(b). Il est important de spécifier que cela correspond aux caractéristiques des produits fournis par le fabricant. Cela représente le fonctionnement réel de ce type de produit et donc est représentatif de systèmes installés dans les bâtiments.

Lors des tests d'obstructions des gaines, les débits peuvent avoir des évolutions surprenantes comme sur les Figures 2.10(a) et 2.10(b). Lorsque le volet est fermé, le débit dans cette gaine diminue et le débit dans l'autre gaine augmente. Ce comportement semble être dû au système DFX90 lui-même. Il y a un problème d'étanchéité à l'air intérieur au système. Cela induit des phénomènes de transfert lors de l'augmentation des pertes de charge dans le réseau.

En ce qui concerne le premier protocole d'encrassement des filtres, l'obstruction d'une partie de la surface d'un filtre servant à reproduire l'encrassement n'est pas représentatif de la réalité physique. Les comportements internes au filtre, comme le champs de vitesse, peuvent être extrêmement différents entre un encrassement homogène et un pourcentage d'obstruction de la surface. Néanmoins l'objectif est d'induire une augmentation de la perte de charge entraînant une diminution du débit comme lors d'un encrassement de filtre. Bien que le sujet de l'étude soit la détection de défaut et pas la filtration, le second protocole a été développé afin de valider le premier. Le fait que les résultats du protocole d'encrassement réel soient similaire à ceux générés par le protocole

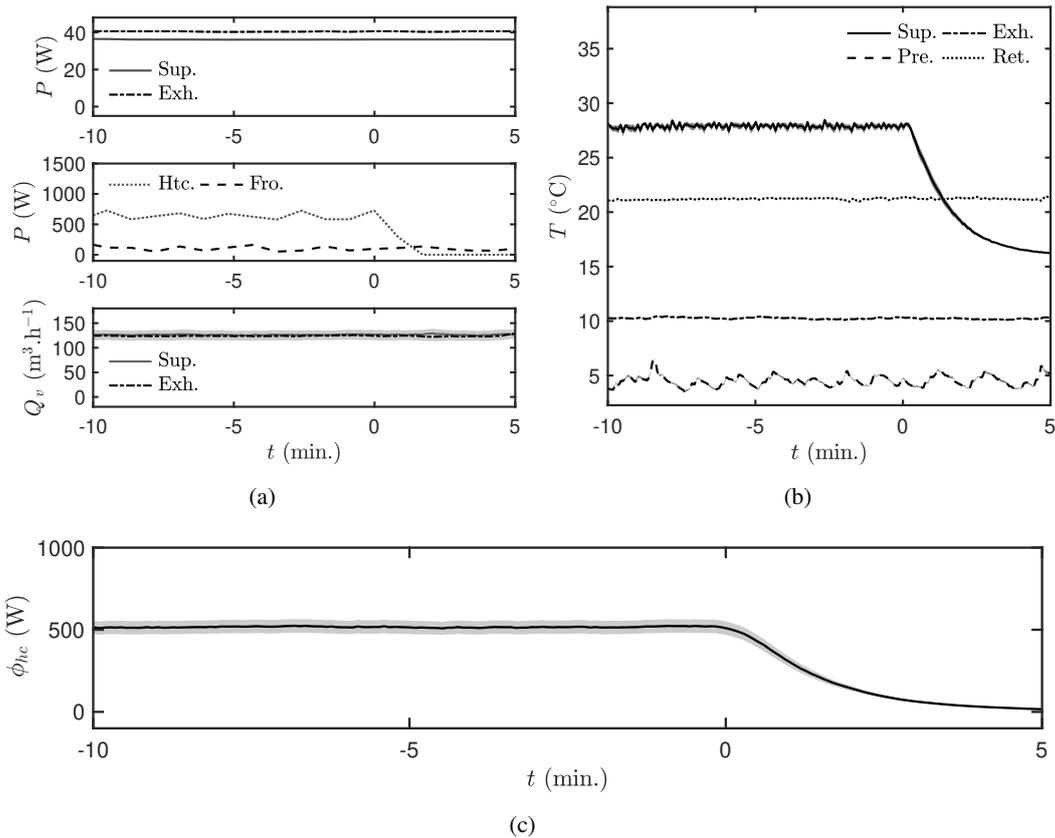


Figure 2.30 – Données expérimentales avec panne de la batterie d’appoint, avec fonctionnement de batterie antigel à petite vitesse.

initial, et se projettent parfaitement sur la courbe expérimentale permet de légitimer ce dernier plus simple à mettre en place. Les résultats du second protocole (encrassement réel) sont similaire et se projettent parfaitement sur la courbe expérimentale générés par le protocole initial. Cela permet de légitimer le second protocole, qui est physiquement moins réaliste mais plus rapide et plus simple à mettre en place. De plus, il aurait été plus intéressant d’avoir des données d’encrassement du filtre continue plutôt que discrète. Mais aucun protocole expérimental ne permettait cet encrassement constant du filtre. Il a donc été préféré de fournir les données sous différents pourcentages d’encrassement car ce phénomène apparait généralement au bout de plusieurs mois voir années de fonctionnement.

## 2.7 Conclusion

### 2.7.1 Synthèse du travail effectué

Un problème majeur du secteur de la détection de défauts dans les système CVC est le manque de base de données fiables. Ces dernières doivent permettre d’entraîner les outils de FDD, d’évaluer leurs performances et de les comparer. Elles donnent lieu à une évaluation et une comparaison objectives. Plusieurs contraintes existent pour générer ces jeux de données de références. Pour entraîner les outils, les données doivent permettre la mise en évidence des défauts. Ils doivent également être en mesure d’assurer une confiance envers les causes de l’apparition de ces défauts.

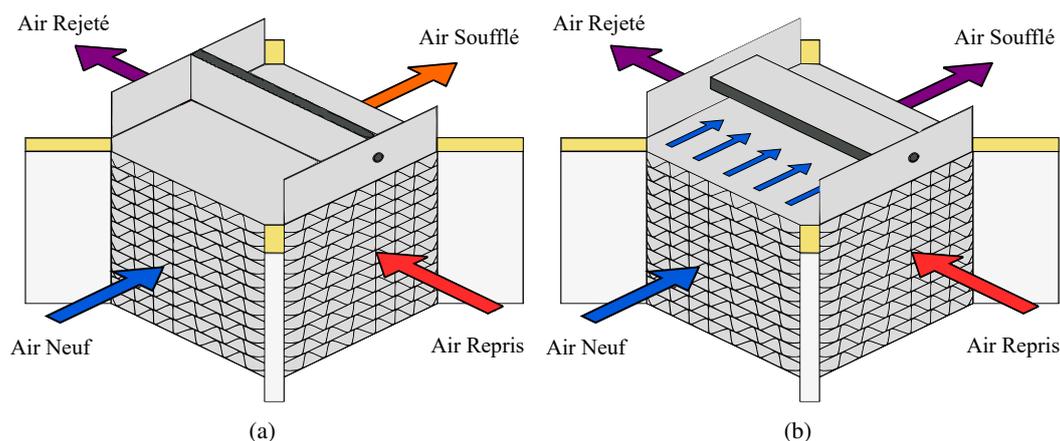


Figure 2.31 – Schema de l'échangeur et de son bypass en position fermé (a) et ouvert (b)

Cette fiabilité passe par un consensus sur le défaut et son apparition appelé *ground truth*. Pour être efficace ces jeux doivent être le plus proche possible des futures données qui seront traitées par l'outil. Afin de s'assurer d'un traitement et d'une sensibilité de l'outil la plus proche des conditions d'installation réelles. Les données expérimentales permettent de répondre à ces objectifs. En effet, contrairement aux données simulées, elles se rapprochent de données réellement traitées par les algorithmes de FDD. Contrairement aux données issues de bâtiments existants elles sont générées en environnement contrôlé ou semi-contrôlé, permettant une meilleure fiabilité et contrôlabilité.

L'élaboration d'un cadre et la génération de données expérimentales ont été effectuées. La création du jeu de données a été effectuée sur un système de type CTA, qui est le plus couramment étudié dans le cadre de la FDD des systèmes CVC.

Le jeu de données créé est de type expérimental. Il a été conçu dans un environnement semi-contrôlé. Des défauts de type *hard faults*, *soft faults* et *operation faults* ont été générés. Ces défauts sont présentés selon trois catégories, global, été et hiver, en fonction de leur saison d'apparition. Les données générées et leur présentation sous le formalisme de la Section 2.5 procurent une grande fiabilité. La diffusion du protocole expérimental permet l'approbation de la génération du défaut et donc du diagnostic. Leur visualisation et les analyses fournies sous un même format induisent une compréhension et une vérification simple et rapide. La génération de données en fonctionnement nominal et défaillant permet de s'assurer de l'existence des défauts par comparaison. En analysant leurs conséquences sur le système, les défauts sont facilement mis en évidence rendant leur apparition indiscutable. Le calcul des incertitudes et leur association aux graphiques augmentent également la confiance dans le jeu de données. Ainsi il pourra être assuré que les défauts détectés sont bien présents en dehors de toute ambiguïté.

Les données ainsi générées permettent de s'affranchir des problématiques habituellement rencontrées. Elles mettent également l'accent sur ce que l'on appelle le *ground truth*, la confiance dans la qualité des données. Avec ce jeu de données d'une grande fiabilité, les outils peuvent donc être entraînés et évalués. Des études comparatives fiables pourront par la suite être établies entre les différents outils de FDD. Ainsi les MOA et les exploitants pourront plus précisément évaluer l'adéquation des outils en fonction de leurs problématiques.

Bien que le système puisse être considéré comme courant, ces défauts lui sont spécifiques. C'est pourquoi, ce type de données doit également être généré pour d'autre type de système avec diverses configurations. Alors les jeux de données couvriront suffisamment de situations pour pouvoir estimer la qualité future d'un outil de FDD sur un système particulier.

## 2.7.2 Utilité de ces données

Les jeux de données réalisés dans cette section vont être utilisés par la suite. L'estimation de la validité de résultat numérique et l'entraînement d'une méthode de FDD seront effectués à l'aide de ces données. L'utilité de ce type de jeux dans le cas de mise en place d'outil de FDD dans le cadre de commissionnement initial sera mis en évidence. Ainsi il pourra être validée l'efficacité de la méthode développée sur un cas de bâtiment neuf.

Dans ce Chapitre les données de fonctionnement nominal et avec défaut d'une centrale de traitement d'air ont été générées. Ces données couvrent un total de 114 fonctionnements possibles, sur deux saisons. Grâce à ce type de données les méthodes de détection de défauts peuvent être testées de façon fiable, mais également entraînées ou calibrées. La création de base de données de ce type peut mener à la création de référentiels permettant d'estimer les performances de différents outils de FDD et donc de les comparer.

## 2.7.3 Vers une ébauche de référentiel

Grâce aux travaux effectués dans cette étude, nous pouvons proposer une ébauche de cadre pour ce type de référentiel expérimental. Ainsi la génération de ce genre de base de données, essentielle dans le secteur de la détection de défauts des systèmes CVC, pourra être généralisée. Ce travail n'a pas la prétention de définir de façon prescriptive le cadre et le contenu de ces données mais de poser les premiers jalons de sa construction. La qualité et la fiabilité des données de test et de comparaison pourront être améliorées.

Cette ébauche de référentiel est décomposée en trois étapes indispensables pour sa conception et son utilisation. La première concerne la génération de ces données, la seconde l'analyse permettant le *ground truth* et la dernière l'organisation pour la diffusion.

### 2.7.3.1 La génération

La génération de ce type de données peut être étendue à tous les systèmes rencontrés dans le domaine du CVC, c'est pourquoi ces directives restent générales.

Les protocoles détaillés concernant la création des différents défauts doivent être impérativement fournis. Ainsi la génération des situations défectueuses pourra être comprise et les causes d'apparition des défauts validées. Cela permet la reproductibilité mais également l'amélioration du protocole si nécessaire.

L'instrumentation mise en place pour l'enregistrement des informations concernant le système devra respecter le critère de réalisme. Cela signifie le respect des us et coutumes de l'instrumentation du système étudié. La mise en place d'un nombre et d'une diversité de capteurs plus important que ce qui est réalisé dans la pratique ne peut être admis. L'objectif étant l'utilisation de ce type d'outil, il ne peut pas être préconisé la mise en place d'une instrumentation nécessaire à l'identification des défauts plus riche que celle qui sera majoritairement rencontrée *in situ*. Afin de respecter cette contrainte seuls les capteurs nécessaires au contrôle du système et des fonctions d'économie d'énergie devront être utilisés. L'intégralité des incertitudes de mesure doit être disponible.

L'enregistrement des informations (pas de temps) devra être assez précis pour permettre d'apprécier les changements de régime du système. Aucune limitation dans la précision de l'enregistrement (fréquence) n'est préconisée afin de permettre la comparaison de la rapidité de la réponse des outils de FDD. En revanche, il ne pourra pas être mis en place des pas de temps d'enregistrement plus grossier que ceux des dispositifs de GTB (de l'ordre de la minute).

Dans un objectif de fiabilité de ce référentiel, il devra être généré des données concernant les défauts mais également concernant le fonctionnement nominal du système. Ainsi les comportements défectueux peuvent être validés directement par rapport aux comportements nominaux. Les

jeux de données des défauts doivent également permettre l'appréciation de l'apparition du défaut. C'est-à-dire qu'il doivent débiter par un état stable en régime nominal, puis passer en régime transitoire à l'apparition du défaut, pour finir dans un régime établi attribuable au défaut.

### 2.7.3.2 L'analyse du *ground truth* et des défauts

Dans un objectif de maximisation de la fiabilité de ces référentiels (*ground truth*), une analyse de chaque jeux de données doit être réalisée. Les analyses ont pour objectifs l'explication des phénomènes rencontrés et la validation de l'état de défaut au sein du jeu de données. Elles doivent être fournies et présentées sous un format identique. Des graphiques mettant en évidence les analyses devront également être réalisés, pour permettre une vision du jeu étudié.

Pour appuyer et valider l'apparition des défauts, des informations complémentaires pourront être présentées. Toute information permettant la validation du défaut pouvant être obtenue par calcul à partir des informations enregistrées pourra être présentée. Bien entendu les équations relatives à l'obtention de ces valeurs devront être explicitées et des calculs d'incertitudes devront être effectués. Afin de mettre en évidence les caractères indéniables des défauts générés, les informations présentées dans les graphiques doivent être représentées avec leurs incertitudes.

### 2.7.3.3 Organisation du référentiel

Afin de simplifier la diffusion et l'utilisation de ces jeux de données, il est important de définir leur structure.

Les fichiers contenant les données devront être fournis au format ASCII .txt pour être facilement diffusables et utilisables par les concepteurs de méthode de FDD. L'organisation des données dans le fichier devra être standardisée. La matrice des données devra comporter les différentes variables en colonne et les pas de temps en ligne. Si jamais des relevés de variables ont été réalisés selon des pas de temps différents (pour des raisons techniques), ils devront être interpolés pour atteindre la fréquence d'enregistrement la plus fine.

Les fichiers de données devront être fournis classés dans une arborescence de dossiers. Cette arborescence doit permettre l'organisation des fichiers selon le type de fonctionnement, le régime, l'élément sur lequel le défaut se produit, le type de défaut. Cette arborescence doit être présentée dans le dossier principal afin de simplifier la récupération des fichiers. L'organisation des fichiers devra être présentée et décrite (abréviations expliquées et unités données). Un tableau des récapitulatifs des défauts générés et de leur indice sera également fourni. Pour finir, le dossier principal devra présenter un schéma de principe du système. Ce dernier devra contenir les différents éléments importants du système ainsi que l'emplacement des différents appareils de mesure.

Grâce aux détails de ces trois étapes, les bases concernant la génération de ce type de données de référence ont pu être partiellement établies. Un exemple de l'organisation est également proposé en Annexe B.



# 3

## Un outil de détection de défaut basé sur une méthode hybride

---

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>75</b>
<b>3.2</b>	<b>Les méthodes de réduction de dimension</b>	<b>75</b>
3.2.1	Le principe	75
3.2.2	Les points particuliers	77
3.2.3	Les méthodes	79
3.2.4	Comparaison des approches pour la FDD	82
<b>3.3</b>	<b>L'outil de détection de défaut et de diagnostic</b>	<b>83</b>
3.3.1	Principe et spécifications	83
3.3.2	La procédure de l'outil	86
3.3.3	Les avantages et limites de cet outil	87
<b>3.4</b>	<b>La méthodologie détaillée</b>	<b>89</b>
3.4.1	L'étape de <i>Pré-traitement</i>	89
3.4.2	L'étape de Création des cartes	92
3.4.3	Phase en temps réel	96
<b>3.5</b>	<b>Utilisation pratique de la méthode</b>	<b>97</b>
3.5.1	Sur bâtiment neuf	97
3.5.2	Sur bâtiment existant	99
<b>3.6</b>	<b>Les données d'entrée de l'outil</b>	<b>100</b>
3.6.1	Les différents cas	100
3.6.2	Les besoins en termes de données	102
3.6.3	Les possibilités en terme de modélisation des défauts	103
<b>3.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>104</b>

---

## 3.1 Introduction

Dans le précédent chapitre, des données expérimentales d'une CTA en environnement semi-contrôlé ont été générées. Ces dernières regroupent des fonctionnements nominaux comme défectueux du système, accompagné d'un *ground truth*. Cela rend ces données fiables et aptes à être utilisées comme référentiel de comparaison entre les méthodes. Ainsi cette base de données se démarque de la littérature en permettant d'estimer leurs capacités aux niveaux des différents critères souhaités des outils de FDD de façon robuste et impartiale.

Dans ce chapitre est développée la méthode de détection de défauts créée lors de ces travaux de thèse. Cet outil se base essentiellement sur deux grands procédés, (i) le savoir expert (ii) et une méthode de réduction de dimension. Comme présenté au Chapitre 1, ces méthodes hybrides (issues de couplage) permettent de pallier aux problèmes inhérents aux méthodes utilisées seules [182]. Dans un premier temps, le concept de la réduction de dimension est introduit. Les points essentiels de ces méthodes sont présentés ainsi que les limitations intrinsèques à ce type de représentation. Ensuite, une présentation non exhaustive des principales méthodes de réduction de dimension est effectuée. A la suite de cet aperçu, une méthode sera sélectionnée parmi celles présentes dans la littérature pour être utilisée dans l'outil de FDD développé. Ce choix se base sur une étude comparative sommaire réalisée sur des données de système défaillant.

Dans un second temps, l'outil de détection développé est présenté. Son principe et les méthodes relatives à la détection de défauts sur lesquels il se base seront détaillés. Ensuite la méthodologie de cet outil sera approfondie. Elle est composée de deux grandes phases, (i) la phase ingénierie amont et (ii) la phase en temps réel. Ces dernières sont composées de trois étapes, le *Pré-Traitement* basé sur le savoir expert et la *Création des cartes* basé sur la réduction de dimension pour la phase ingénierie amont et celle de *Détection et Diagnostic* pour la phase en temps réel.

Ensuite nous présenterons la mise en place de cet outil de FDD dans différents scénarios. Cette méthode est développée de façon à pouvoir être implémentée sur des bâtiments neufs comme existants. Ainsi, il sera détaillé comment cette dernière peut être mise en œuvre dans un cas de commissionnement initial (bâtiments neufs) et de commissionnement de bâtiment existant (re, retro ou commissionnement continu). Ces deux possibilités d'installation de l'outil induisent des besoins différents en terme de données, qui seront analysés.

## 3.2 Les méthodes de réduction de dimension

### 3.2.1 Le principe

Les méthodes de réduction de dimension aussi appelées statistiques ou analyses multivariées, sont connues en Anglais sous le terme *Manifold Learning*. L'objectif de ces méthodes est de réduire un espace de grande dimension en une représentation fidèle dans un espace de dimension inférieure raisonnable. Ces méthodes ont trouvé nombre d'applications dans différents domaines, traitant un nombre conséquent de données, comme le data-mining, la reconnaissance numérique, l'analyse de données photographiques et vocales ou le traitement de réseaux de capteurs... [19, 105, 167] En effet, en une trentaine d'années les volumes des bases de données ont été multipliés par en moyenne entre  $10^6$  et  $10^9$ . Ces méthodes peuvent être utilisées à des fins différentes. La plus flagrante est bien-sûr la possibilité de visualisation, rendant plus rapide et intuitif l'analyse de données. Elles peuvent également être utilisées pour aider à révéler les paramètres les plus influents dans un jeu de données, réduire les espaces de stockage ou réduire les temps d'apprentissage et d'utilisation [11].

L'idée sous-jacente principale sur laquelle se base ces algorithmes est que le nombre de dimensions des jeux de données est souvent artificiellement élevé. On pourrait dire que les jeux de données sont en fait des échantillons de faible dimension regroupés dans un espace de grande dimension (hypothèse justifiée historiquement par le rasoir d'Occam [79]).

Pour comprendre simplement le principe du *Manifold Learning*, il peut être pris l'exemple de la Terre. Localement tout point à sa surface est composé de coordonnées en trois dimensions. Deux coordonnées pour la localisation et une pour l'altitude. Globalement, c'est la surface d'une sphère (en  $2D$ ) dans un espace en  $3D$ . Un *Manifold* (variété en français) est un espace topologique localement Euclidien [79], une représentation est donnée en Figure 3.1. L'objectif est de réduire le nombre de dimension tout en conservant le plus d'informations possible du jeu d'origine. Cela signifie donc fournir une représentation qui conserve de façon maximale la géométrie de la dispersion des points dans l'espace d'origine.

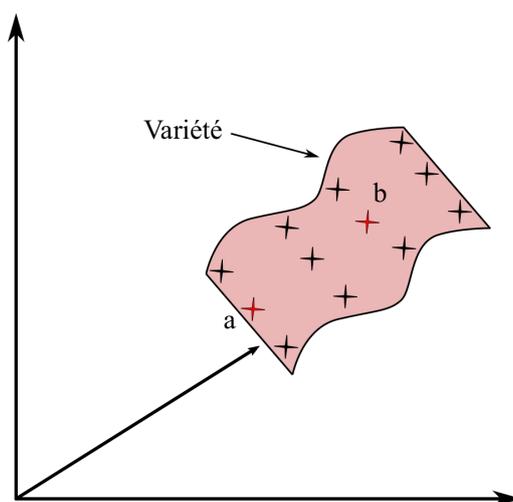


Figure 3.1 – Exemple de variété.

Dans les problèmes de réduction de dimension, les données d'entrée peuvent être de n'importe quelle forme. Ces données sont de dimension  $N$ , supérieure à trois, c'est à dire que chaque individu possède  $N$  variables informatives. Ces données sont connues. Chaque variable est considérée comme une dimension. Pour chaque individu les valeurs de ces  $N$  variables représentent ses coordonnées dans l'espace à  $N$  dimensions. Les méthodes de réduction de dimension cherchent à conserver le maximum d'informations contenues dans l'espace d'origine. Pour cela l'objectif est de conserver les relations entre les points de cet espace.

Il existe plusieurs méthodes utilisant des moyens différents pour tenter de conserver la géométrie d'origine. Certaines méthodes sont linéaires, comme la *Principal component analysis* (PCA) ou la *Multi-dimensional Scaling* (MDS). Elles supposent que les données d'origine sont contenues dans un sous espace vectoriel linéaire de l'espace grande dimension. D'autres méthodes sont non-linéaires comme ISOMAP, DDHDS, RankVisu, t-SNE ou ASKI. Une autre distinction qui peut être faite concerne la façon de conserver l'information de l'espace d'origine. Certaines méthodes cherchent à conserver les propriétés globales de l'espace d'origine et d'autres cherchent à préserver les propriétés locales. Les méthodes attachées aux propriétés globales ont tendance à conserver la matrice des distances entre les points la plus fidèle possible entre l'espace d'origine et celui de dimension réduit. La matrice des distances  $d$  est une matrice carrée symétrique regroupant toutes les distances (souvent euclidiennes) points à points. D'autres méthodes privilégient la conservation des rangs de voisinage ( $n$  proches voisins) des points moins sensibles au fléau de la dimension (e.g. RankVisu) [109]. Les méthodes attachées aux propriétés locales, tentent de conser-

ver une forte représentativité dans le voisinage des points. Ces différentes approches induisent des résultats différents. Un exemple parlant est celui du test du *Swissroll*. Cette forme correspond à une sorte de page enroulée sur elle-même. La Figure 3.2 présente les résultats en 2D de plusieurs algorithmes à ce test, réalisé avec un jeu de données de 5000 points et avec un critère de 10 voisins conservés.

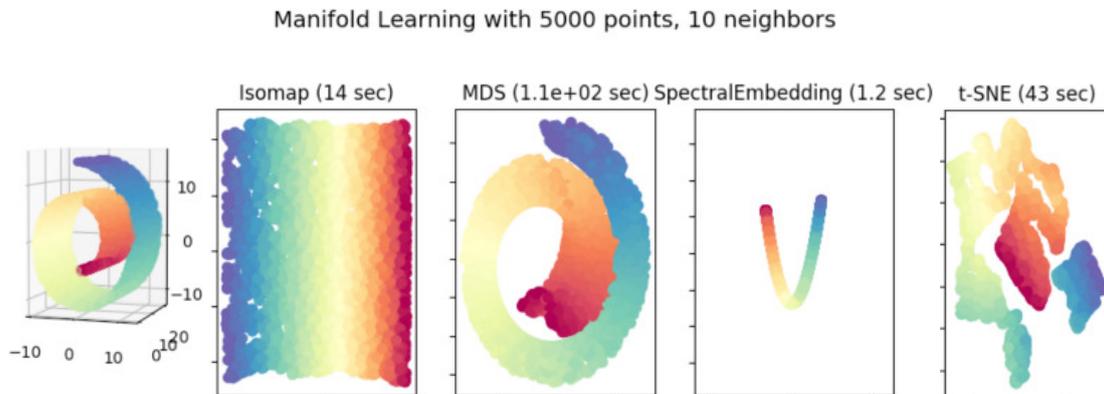


Figure 3.2 – Exemple de réductions de dimension repris de [1].

On constate que chaque méthode de réduction de dimension présentée propose une projection différente en fonction des propriétés qu'elle cherche à conserver. Par exemple, il est évident que la méthode Isomap ainsi que la méthode SpectralEmbedding cherchent à conserver les propriétés locales de la variété dans leur représentation. Cela se traduit par la conservation des voisinages de points quitte à ne pas respecter la *forme globale* de la variété (les représentations de ces méthodes ne sont plus enroulées). La méthode MDS contrairement aux précédentes cherche à conserver au mieux les propriétés globales des points de l'espace d'origine. Cela se manifeste par une bonne représentation de cette forme enroulée en contre partie de perte d'autres informations du jeu d'origine (comme une moins bonne appréciation de la profondeur ou de l'écartement de certains points). La méthode t-SNE cherche à conserver les propriétés locales des données en grande dimension en révélant également la structure globale (avec des analyses de cluster à différentes échelles).

### 3.2.2 Les points particuliers

Dans le cadre de cet outil de FDD, les méthodes de réduction de dimension sont utilisées pour présenter les données et plus particulièrement pour mettre en évidence les clusters de défauts pour simplifier la visualisation. Il n'en demeure pas moins important de spécifier quelques points particuliers concernant ces méthodes, dont l'influence est capitale. Comme expliqué précédemment, les méthodes de réduction de dimension ont pour objectif de proposer une matrice ayant une dimension réduite par rapport à la matrice originelle. Cela doit se faire en conservant de façon optimale l'information initialement contenue dans la matrice de base. Bien entendu, il n'est pas possible de réduire la dimension de la matrice initiale sans en détériorer légèrement l'information contenue. Ces pertes d'informations résultent d'un compromis entre la préservation de relations très locales et de structure à plus grande échelle. C'est pourquoi il existe un paramètre essentiel dans les méthodes de réduction de dimension qui sert à fixer une contrainte quand à la réduction de dimension. Ce paramètre s'appelle le *nombre de proches voisins*.

Ce paramètre indique le nombre de voisins, qui sont des points proches dans l'espace d'origine, ils devront être conservés dans l'espace de dimension réduite. Ce nombre permet donc de fixer l'échelle du voisinage à considérer. Il est important car il détermine la façon dont l'information (au sens de conservation des distances d'origine entre les points) va être conservée. En effet, la sélection d'un nombre de proches voisins donne alors une information sur la fidélité souhaitée dans

l'espace de représentation. Cela correspond à la taille du volume autour du point dont on souhaite qu'elle soit le plus fidèlement représentée dans l'espace de dimension réduite. Ce concept est illustré dans la Figure 3.3. Dans la Figure 3.3(a) seuls trois voisins sont conservés. Cela signifie que la réduction de dimension ne cherchera pas à conserver les distances reliant le point rouge aux autres en dehors du volume représenté. Les deux points proches de ce volume peuvent se retrouver éloignés du point rouge dans l'espace de représentation. Dans la Figure 3.3(b) deux voisins supplémentaires ont été inclus. Le volume regroupant les distances à conserver est plus important dans l'espace d'origine. Les deux points qui pouvaient se retrouver éloignés pour la première représentation vont devoir être pris en compte dans la deuxième approche. Ils se retrouveront aussi proches du point rouge dans l'espace de représentation (réduit) que dans celui d'origine. Bien que l'augmentation du nombre de proches voisins améliore la fidélité de la nouvelle représentation pour les points ajoutés, cela se fait au détriment de la précision de la représentation des points sélectionnés préalablement.

Ce nombre de voisins à conserver peut également être spécifié en terme de rayon autour du point pris en compte.

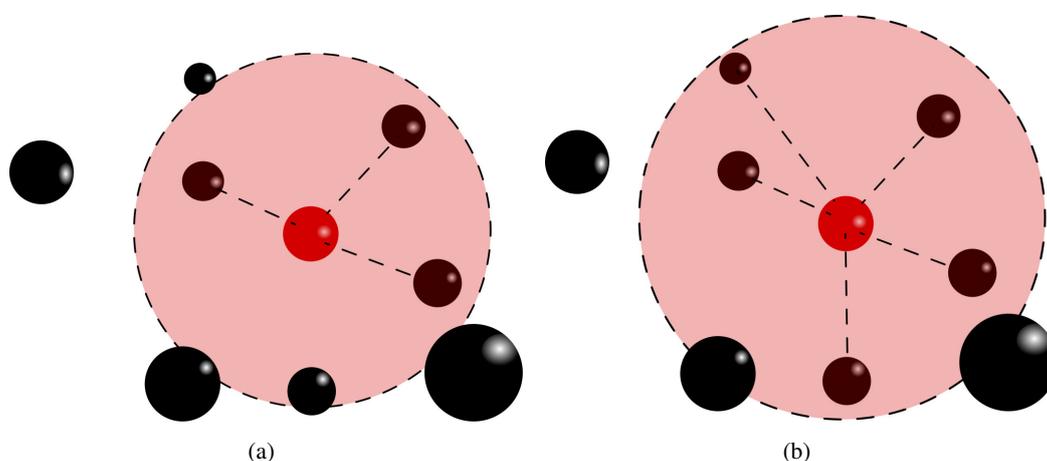


Figure 3.3 – Volume de conservation des distances autour du points pour 3 voisins (a) et 5 voisins (b).

Il est donc clair que la sélection du nombre de proches voisins à conserver est extrêmement importante pour le rendu de la réduction (avec la dispersion des points dans l'espace d'origine). Son choix influe sur l'impact des deux principaux problèmes intrinsèques aux réductions de dimension les *False Neighborhoods* et les *Tears*.

Ces deux phénomènes sont indissociables et inévitables dans toute réduction de dimension [108]. Ils vont être illustrés avec l'exemple de la représentation d'une sphère en dimension deux. Les phénomènes de faux voisinages (*False Neighborhoods*) traduit le fait que l'espace de dimension réduite rapproche des points qui se trouvaient éloignés dans l'espace d'origine. Ce phénomène induit ce que l'on appelle un problème de fiabilité de la représentation. Cela crée des relations de voisinage entre les données n'existant initialement pas. Il peut survenir lorsque le nombre de voisin à conserver est trop important. Par exemple ce défaut peut être schématisé par une représentation du globe terrestre qui serait aplati le long d'un méridien. Cela correspond à la superposition des deux hémisphères d'une mappemonde comme présenté en Figure 3.4. Les pays initialement éloignés se retrouveraient superposés sur ce type de réduction.

Les phénomènes de déchirement (*Tears*) peuvent être présentés comme la déformation inverse du faux voisinage, dans la représentation en dimension inférieure. Des points initialement proches dans l'espace d'origine deviennent éloignés dans l'espace de représentation. Ce défaut induit ce que l'on nomme des discontinuités dans la représentation. Il manque donc des relations de proxi-



Figure 3.4 – Globe terrestre, faux voisinage.

mité existant initialement entre ces points dans l'espace de dimension réduite. Il y a une perte d'information dans l'espace de représentation. Ce phénomène peut être simplement illustré via une autre représentation du globe terrestre qui est le planisphère présenté en Figure 3.5. Sur cette représentation les points au niveau de l'océan pacifique et des pôles sont déchirés. Le paramètre le plus important est le nombre de proches voisins conservés.

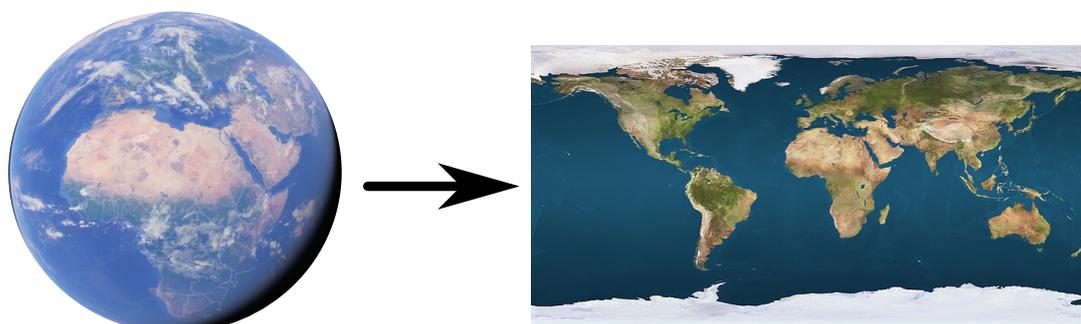


Figure 3.5 – Globe terrestre, déchirement.

Dans notre utilisation de ces méthodes de réduction de dimension, il est possible de tirer partie de ces pertes d'informations. Par exemple, le phénomène de déchirement peut être utilisé afin de chercher à bien séparer les cas nominaux et défectueux du système étudié.

### 3.2.3 Les méthodes

Il ne sera pas ici détaillé toutes les différences entre ces méthodes, mais présenté seulement le concept de base de quelques unes des méthodes existantes. Les méthodes de réduction de dimension seront présentées selon le type de données sur lequel elles sont efficaces. Bien qu'il existe une multitude de taxonomies pour les méthodes de réduction [105], il a été choisi cette dernière qui est la plus simple et la plus utilisée. Cette différenciation porte donc sur les méthodes dites linéaires et celles non linéaires.

#### 3.2.3.1 Méthodes linéaires

Ces méthodes effectuent une réduction de dimension en incorporant les données dans un sous-espace linéaire de dimensions inférieures [167]. Comme introduit précédemment ces méthodes

sous entendent que l'essentiel des informations contenues dans le jeu de données peut être capturé dans ce type d'espace.

**Principal Component Analysis - PCA :** La PCA, ou *Analyse en Composantes Principales* en français, également connue sous le nom de transformation de KARHUNEN-LOEVE, est sans aucun doute la méthode de réduction de dimension la plus connue et la plus couramment utilisée [19]. C'est une ancienne méthode initialement proposée par PEARSON [138], puis ensuite par HOTELING [75] et utilisée plus tard pour de la reconnaissance d'image [121]. Le principe de base de la PCA est de rechercher dans les données d'origine de dimension  $n$  le sous-espace linéaire de dimension  $d$ , tel que  $d \ll n$  dans lequel la majorité des points sont représentés. Cette recherche passe par la résolution d'un problème aux valeurs propres. Cela signifie que ce sous-espace est celui qui restitue le plus fidèlement la dispersion des points dans l'espace d'origine. Les *composantes principales* correspondent aux axes sur lesquels sera effectuée la projection des points dans l'espace de dimension réduite. La première composante principale est celle sur laquelle la projection des points possède la plus grande dispersion et la plus faible erreur quadratique moyenne correspond à la plus grande valeur propre. Les  $n$  composantes suivantes correspondent aux  $n$  axes orthogonaux à la première composante sur lesquels la variance est la plus élevée. Ce problème peut être résolu en déterminant les vecteurs et valeurs propres.

$$M \cdot V = \lambda V, \quad (3.1)$$

où  $M = \text{Cov}(x)$  est la matrice de covariance des points dans l'espace d'origine, et  $\lambda$  les valeurs propres. Alors les  $x_i$  individus de l'espace d'origine peuvent être visualisés en étant projetés par

$$y_i = E \cdot x_i, \quad (3.2)$$

où  $y_i$  est la représentation des  $x_i$  dans l'espace de dimension réduite et  $E$  est la matrice des  $n$  plus grandes valeurs propres retenues.

**Multidimensional Scaling - MDS** La méthode MDS (*de positionnement multidimensionnel* en français) est relativement similaire à l'analyse en composante principale [164]. La différence réside dans le fait que cette méthode travaille sur les distances (matrice des distances) entre les points et non pas sur des corrélations (matrice de covariance). Pour un espace à  $n$  individus, à la place de chercher à maximiser la dispersion des points, cette méthode cherche à conserver les  $n(n-1)/2$  distances entre ces points. MDS fournit des résultats similaires à une PCA dans le cas où les distances sont considérées comme euclidienne mais il existe de nombreuses autres métriques (géodésique...). De façon générale, cette méthode cherche à minimiser la fonction coût

$$C_{MDS} = \sum_{i,j} (d(x_i, x_j) - d(y_i, y_j))^2, \quad (3.3)$$

où  $d(x_i, x_j)$  représente les distances dans l'espace d'origine et  $d(y_i, y_j)$  les distances dans l'espace de représentation associées aux individus  $i$  et  $j$ .

Il est à noter que les méthodes de réduction linéaires postulent que les données d'origine existent et donc peuvent être représentées dans un sous-espace linéaire. Mais si l'espace étudié est hautement non linéaire et ne contient aucun sous-espace linéaire permettant de capturer la diversité des données, alors ces méthodes se révèlent inefficaces. C'est pour ces raisons que nous nous sommes plutôt tournés vers des méthodes ne possédant pas ces limitations.

### 3.2.3.2 Méthodes non linéaires

Dans cette section les méthodes de réduction de dimension non-linéaire vont être développées. Bien que ces méthodes partagent le même objectif que les méthodes linéaires, elles n'émettent pas les mêmes hypothèses concernant les jeux de données qu'elles traitent. Ces méthodes ne supposent pas que les données puissent être contenues dans un sous-espace linéaire de l'espace de grande dimension original. Elles cherchent donc à créer des représentations qui soient capables de mieux approximer la structure géométrique des données initiales dans les cas non linéaires.

**Isometric feature mapping - ISOMAP** La méthode de réduction ISOMAP peut être vue comme une extension de MDS. Elle tente de préserver les propriétés non linéaires de l'espace d'origine via la conservation des distances géodésiques entre les points contenus dans une variété [161]. La Figure 3.6 illustre les distances euclidiennes et géodésiques entre deux points de la variété présentée en Figure 3.1. La distance géodésique est la plus courte distance entre deux points situés sur une surface. Cette méthode peut être décomposée en deux grandes étapes. La première concerne l'estimation des distances géodésiques dans la variété. ISOMAP assume que les distances géodésiques dans la variété entre les  $k$  proches voisins peuvent être correctement approximées par les distances euclidiennes. Un graphe reliant chaque individu à ses proches voisins est créé et les distances géodésiques entre deux points de ce graphe peuvent alors être déterminées par le plus court chemin les reliant. La seconde étape exécute un MDS à la matrice de ces distances afin de déterminer l'espace de dimension réduite permettant au mieux cette représentation.

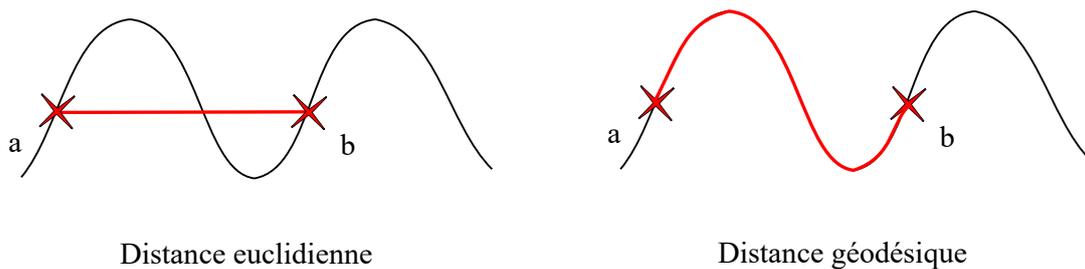


Figure 3.6 – Distances entre le point  $a$  et  $b$ .

**RankVisu** La méthode RankVisu se différencie des autres méthodes de réduction dans le sens où elle ne cherche pas à conserver les distances mais les rangs de voisinage entre les points [107]. Cela signifie que l'on regarde l'ordre de proximité des points (*i.e.* le point le plus proche d'un autre et de rang 1, le second de rang 2, etc.) plutôt que la proximité elle-même (*i.e.* la distance). Il est à noter que contrairement à la matrice des distances, la matrice des rangs de voisinage n'est pas forcément symétrique. La fonction coût de cette méthode cherche donc à minimiser la différence entre les matrices de rang de voisinage des espaces d'origine et de représentation.

$$C_{RK} = \sum_{i,j} (k + 1 - \min(D_{i,j}, \Delta_{i,j})) \times |D_{i,j} - \Delta_{i,j}|, \quad (3.4)$$

où  $k$  est le nombre de plus proche de voisinage à conserver,  $D_{i,j}$  et  $\Delta_{i,j}$  la valeur du rang de voisinage de  $j$  par rapport à  $i$  respectivement dans l'espace d'origine et de représentation.

**t-Stochastic Neighbour Embedding - t-SNE** La méthode t-SNE [166] est une variante de la méthode SNE [73]. Plutôt que de préserver les corrélations ou les distances, elle s'attache aux probabilités de voisinage. En convertissant les distances euclidiennes des individus en probabilités conditionnelles représentant leurs similarités. Ainsi les points proches se voient attribuer une probabilité élevée et les points éloignés une probabilité quasi-nulle. La probabilité que  $x_i$  retienne  $x_j$

comme voisin, si cette sélection est effectuée selon leur densité de probabilité sous une distribution gaussienne centrée en  $x_i$  :

$$p_{i|j} = \frac{\exp(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma_i^2)}{\sum_{k \neq i} \exp(-\|x_i - x_k\|^2 / 2\sigma_i^2)}, \quad (3.5)$$

où  $\sigma_i$  est la variance de la gaussienne centrée au point  $x_i$ . Les probabilités de voisinage de l'espace de dimension réduite sont elles calculées par une distribution de STUDENT (différence avec la méthode SNE qui utilise une gaussienne).

$$q_{i|j} = \frac{(1 + \|y_i - y_j\|^2)^{-1}}{\sum_{k \neq i} (1 + \|y_i - y_k\|^2)^{-1}}, \quad (3.6)$$

Puis l'espace de représentation est déterminé comme celui minimisant la différence entre ces deux probabilités.

$$C_{t-SNE} = \sum_i \sum_j p_{i,j} \log \frac{p_{ij}}{q_{ij}}, \quad (3.7)$$

**ASKI** La méthode ASKI est une méthode dérivée de la méthode t-SNE et se rapprochant de la méthode tt-SNE [33]. La principale différence de ces méthodes avec t-SNE, est l'utilisation de la distribution de STUDENT pour les probabilités de voisinage de l'espace d'origine.

$$p_{i|j} = \frac{(1 + \|x_i - x_j\|^2)^{-1}}{\sum_{k \neq i} (1 + \|x_i - x_k\|^2)^{-1}}, \quad (3.8)$$

### 3.2.4 Comparaison des approches pour la FDD

Dans le cadre du développement de cet outil de FDD, plusieurs de ces méthodes ont été testées. Ainsi, les résultats des différentes méthodes ont pu être comparés. Cette comparaison à été faite sur des données de bâtiment et de son système contenant des défauts, traitées par l'outil de FDD développé. Les données du système ont été générées numériquement avec le logiciel de simulation EnergyPlus. La génération de ces données est expliquée en détail dans l'Annexe D et dans le Chapitre 4. Le seul critère qui a été retenu pour le choix de la méthode associée à cet outil de FDD est la qualité de la représentation en deux dimensions. Dans le cadre de notre outil la qualité de la représentation correspond à une clusterisation claire des différentes zones représentant les défauts à identifier. Ces dernières sont représentées par des points de couleur différente en fonction du défaut. Ces zones doivent être isolées pour pouvoir être repérées rapidement et ne pas être confondues. Les différentes zones correspondent au fonctionnement du système avec un certain défaut. Chaque défaut est représenté avec une couleur spécifique. Une brève présentation des résultats obtenus par quelques-unes des méthodes introduites dans la section précédente est donnée en Figures 3.7 et 3.8.

Toutes les zones à étudier ont bien été clusterisées sur chacune des cartes fournies par les différentes méthodes. A l'aide de cette étude comparative, on constate que les méthodes linéaires sont celles fournissant des résultats les moins visuellement intéressants. Les méthodes de réduction non linéaires permettent de mieux isoler chaque cluster. Celles fournissant les résultats les plus convenables pour notre étude sont t-SNE et ASKI. On constate même une similarité dans les représentations. Néanmoins, la méthode ASKI est celle ayant permis d'obtenir des résultats

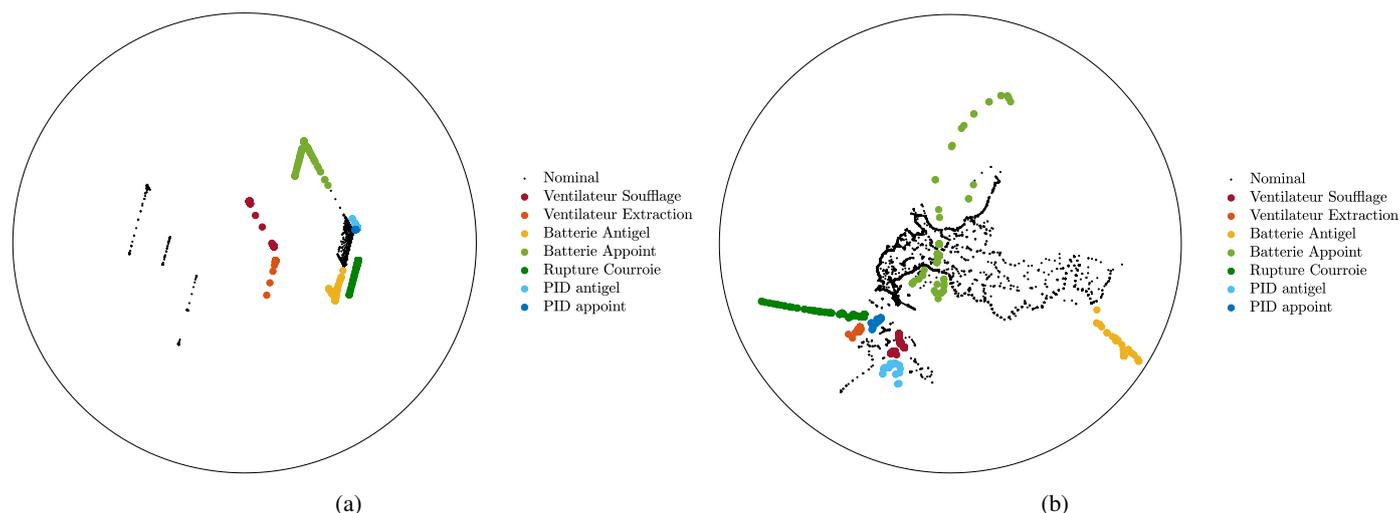


Figure 3.7 – Résultats expérimentaux de la méthode MDS (a) et RankVisu (b).

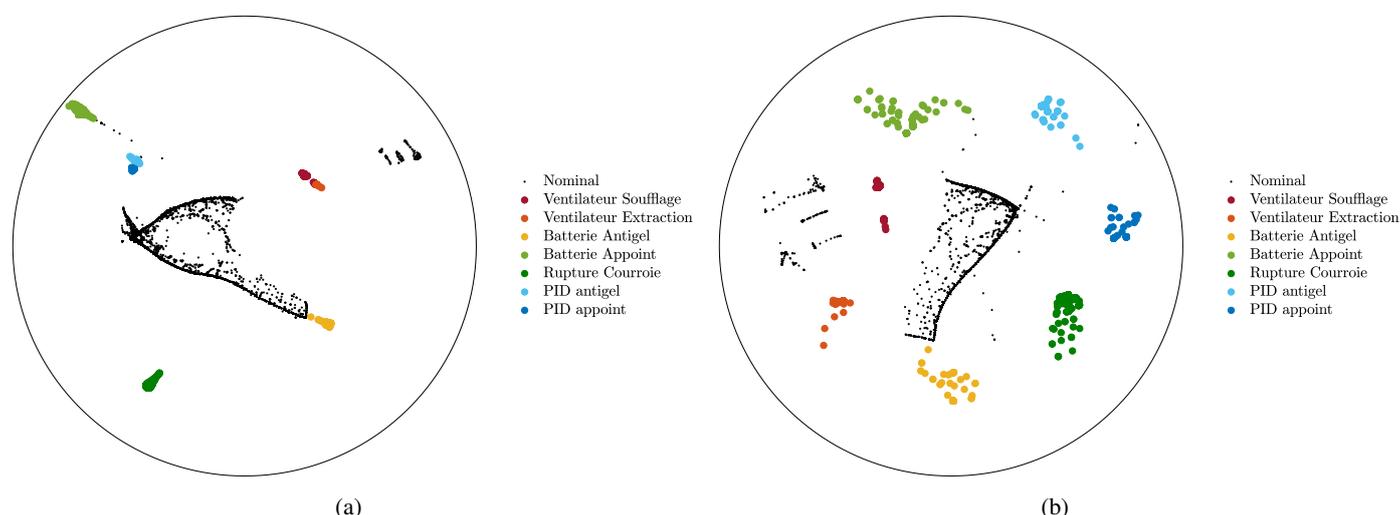


Figure 3.8 – Résultats expérimentaux de la méthode t-SNE (a) et ASKI (b).

les plus satisfaisants au niveau des rendus visuels. Elle permet de bien isoler les comportements défectueux et de les espacer relativement clairement. C'est donc sur cette méthode que notre choix s'est arrêté pour la suite de ce document.

### 3.3 L'outil de détection de défaut et de diagnostic

#### 3.3.1 Principe et spécifications

Comme cela fut présenté précédemment, les méthodes de FDD actuelles souffrent d'un manque d'implémentation, elles sont peu mises en place réellement dans les systèmes [94, 96]. Les deux principaux verrous associés à ce manque d'installation sont que les méthodes ne sont pas orientées utilisateurs (et souvent pas totalement automatisées) et trop spécialisées. Afin de répondre à ces

problématiques il a été choisi de développer un outil complètement orienté utilisateur, permettant de résoudre également le problème de qualification du personnel. Cet outil permettra de fournir une représentation simple et didactique, de l'apparition des défauts en temps réel.

Cet outil est développé selon une approche combinée basée sur la connaissance et sur les données. Ces méthodes, qualifiées d'*hybrides* ont montré qu'elles sont plus efficaces que les méthodes prises séparément [182]. Ainsi, grâce à cette combinaison l'outil peut pallier aux déficits intrinsèques dus à l'une des méthodes grâce aux avantages de l'autre. Par exemple, le fait d'utiliser les données pour l'apprentissage de l'outil permet d'effectuer de la détection de façon relativement satisfaisante, mais est limitant au niveau des diagnostics. Avec le couplage d'une méthode basée sur la connaissance, les données pourront être directement traitées et un diagnostic pourra être associé aux différents comportements. Un schéma présentant les principaux éléments constitutifs de l'outil est proposé en Figure 3.9.

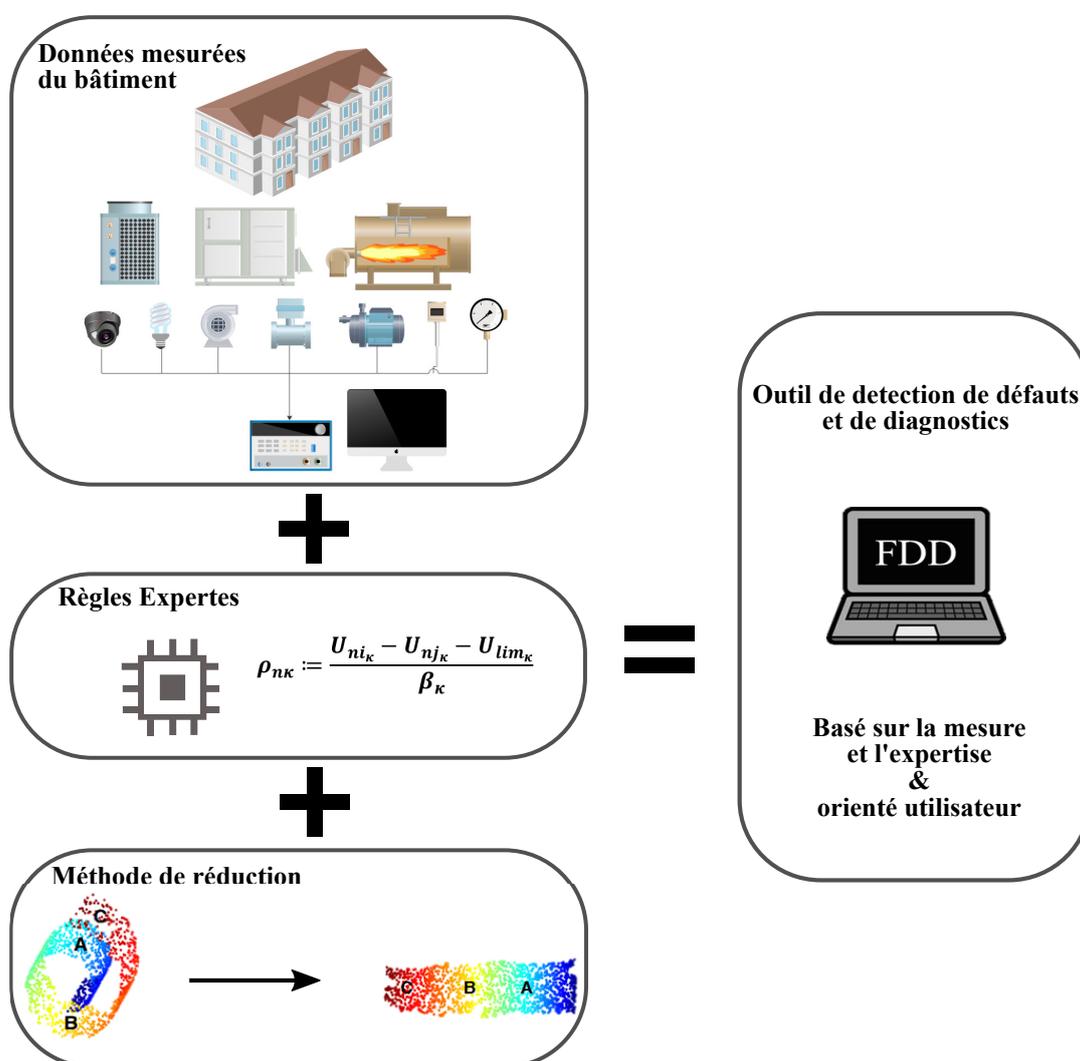


Figure 3.9 – Fondements de l'outil de FDD.

L'outil est basé sur les données car il nécessite l'utilisation d'une quantité d'informations utiles pour lui permettre d'être opérationnel avant sa mise en place. Des données sont utilisées pour entraîner l'algorithme c'est-à-dire lui permettre de différencier les différents comportements à mettre en évidence. Les données pour l'entraînement doivent être du même type que celles qui seront ensuite récoltées par le système de GTB et traitées dans l'outil de FDD. Ces dernières

doivent être en rapport avec le fonctionnement du système sur lequel la méthode de FDD sera déployée. Elles doivent également couvrir les fonctionnements souhaitant être mis en évidence. Cela signifie que le fonctionnement nominal doit être couvert, mais également tout fonctionnement défaillant à détecter. Le manque d'informations induit donc des limitations dans l'utilisation de la méthode, bien que cela n'empêchera pas son pouvoir de détection.

L'outil est également basé sur la connaissance et plus particulièrement sur ce qui est appelé *des règles expertes*. Ces règles sont des règles logiques mettant en relation des informations concernant le système avec son état de fonctionnement. Les informations relatives au système sont les données relevées par le système de GTB. En fonction du nombre, du type et de la qualité de ces informations, les règles sont créées. Ces règles doivent être en mesure de mettre en évidence les défauts souhaités avec les informations à disposition. C'est l'avantage comme l'inconvénient de ce type de méthode. En effet, certains défauts pourront être mis en évidence malgré le peu d'informations disponibles. En revanche la qualité des diagnostics est fortement dépendante du nombre de capteurs.

En plus de coupler deux méthodes de détection de défauts, cet outil les associe à une visualisation des résultats. Cette représentation du fonctionnement du bâtiment est réalisée en temps réel avec l'utilisation d'une méthode de projection des données. Les données relevées par le système de GTB sont traitées en temps réel par les règles expertes et représentées sur les résultats de la méthode basée sur les données. Un logigramme présentant le principe d'utilisation de l'outil est présenté en Figure 3.10.

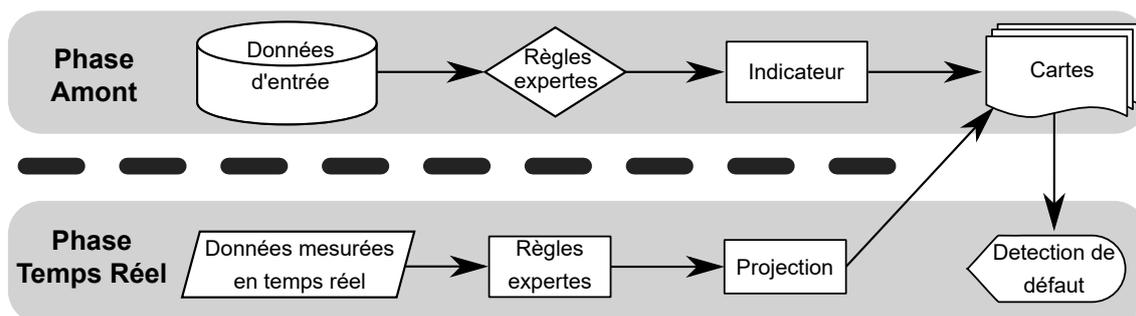


Figure 3.10 – Principe d'utilisation de l'outil de FDD.

### 3.3.1.1 Les différentes données d'entrée

Afin d'éviter toute incompréhension dans la suite du document, des précisions vont être apportées sur les différentes données d'entrée. Dans cette méthode de détection de défaut deux différentes étapes nécessitent l'utilisation de *données d'entrée*. Ces étapes sont, la phase de Traitement (et de Pré-Traitement en Ingénierie d'amont) et la phase de Création des cartes. Néanmoins, ces deux *types* de données d'entrée contiennent des informations distinctes et doivent donc être différenciées.

Concernant la phase de Traitement (ou de Pré-Traitement), les données d'entrée qui sont utilisées sont des données mesurées. Ce sont les différents points relevés par le dispositif de suivi du bâtiment (GTB) qui sont exploités. Ces données subissent ensuite les multiples manipulations de la phase de Traitement afin de pouvoir mettre en évidence les défauts. A ce stade les données peuvent être appelées *données pré-traitées*.

La seconde étape utilisant des données d'entrée est la phase Création des cartes en ingénierie d'amont. Lors de cette phase des données d'entrée doivent être traitées par la méthode de réduction de dimension pour pouvoir permettre leur représentation 2D. Les données d'entrée de cette étape sont les *données pré-traitées*, donc ayant subi la phase de Pré-Traitement. En effet, ces dernières grâce aux manipulations qu'elles ont subi permettent de déterminer si des défauts sont

présents.

### 3.3.2 La procédure de l'outil

L'outil de FDD développé est de type embarqué dans les système de GTB. Ce n'est pas un outil de détection de défauts ponctuel (*one-shot*) comme il en existe. Cet outil doit donc être alimenté par de la donnée en temps réel fournie par le dispositif de gestion technique. Ainsi il est en mesure d'effectuer la détection des défauts et peut fournir un diagnostic instantané du fonctionnement du système suivi.

Néanmoins, cet outil de FDD nécessite un travail non négligeable préalable à sa mise en place, afin d'être opérationnel. Le déploiement de cette méthode de détection de défaut peut être divisé en trois étapes principales qui sont résumées dans la Figure 3.11. Les deux premières étapes, de *Pré-traitement* et de *création des cartes*, concerne l'élaboration du fonctionnement de l'outil et son entraînement. Comme expliqué précédemment, cet outil n'est pas générique et il doit être adapté au système sur lequel il sera déployé. Ces deux étapes concernent donc une phase d'ingénierie d'amont (*i.e.* avant l'implémentation de l'outil dans la GTB). Elles sont relativement longues et complexes à réaliser mais permettent à l'outil d'être complètement automatisé (AFDD). En fonction du type de bâtiment sur lequel cet outil est développé, les données d'entrée nécessaires sont différentes. En cas de bâtiment neuf, ces données doivent être générées par l'ingénieur via simulation énergétique dynamique (SED) alors qu'en cas d'implémentation dans le dispositif de GTB d'un bâtiment existant, ces données sont les data historiques disponibles du système. La méthode reste néanmoins identiques.

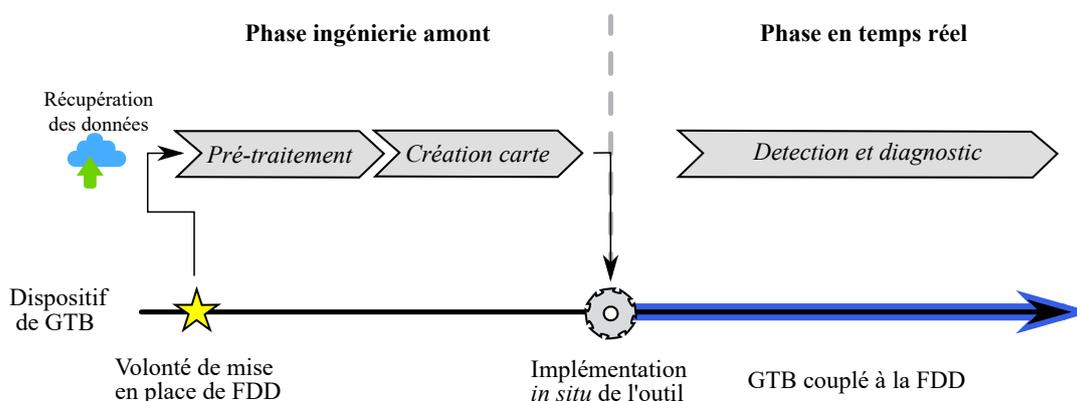


Figure 3.11 – Procédure générale de l'outil de FDD.

Lors de la première étape de la phase d'ingénierie amont, le savoir expert est formalisé. C'est à cette étape que la majorité du temps d'ingénierie est consacrée. C'est grâce à cette formalisation du savoir que les différents défauts seront détectés.

La seconde étape de cette phase d'ingénierie amont, concerne l'*entraînement* et la fourniture du diagnostic. Les données d'entrée, mentionnées précédemment, sont utilisées afin d'optimiser la visualisation du diagnostic. Cette étape est la plus coûteuse en terme de temps de calcul. De plus, elle nécessite des itérations afin de trouver la meilleure représentation visuelle.

La troisième étape (seule étape principale de la phase en temps réel) concerne l'exécution de la méthode en temps réel *in situ*. Durant cette phase, l'outil a été implémenté dans la GTB, les données relevées par ce dispositif de suivi sont traitées instantanément par la méthode de FDD. L'outil fournit aux opérateurs une détection des défauts et un diagnostic immédiat de l'état du système. Le contenu technique des différentes étapes est détaillé dans la Section 3.4 et la déclinaison de la méthode en fonction du type de commissionnement en Section 3.5.

### 3.3.3 Les avantages et limites de cet outil

Certains avantages de cet outil peuvent être soulignés sur différents points. D'abord comme expliqué ci-dessus l'outil de détection de défauts développé est basé sur deux méthodes, celle basée sur les données et celle basée sur le savoir expert. Ainsi elle permet une optimisation par rapport à l'utilisation d'une méthode simple en réduisant les faiblesses inhérentes des deux méthodes.

Ensuite, cet outil possède la qualité d'être extrêmement souple. Contrairement à de nombreux dispositifs existant très spécialisés [93] ce dernier peut être adapté à tous types de systèmes mais également tous types de conceptions (nombre et présence des capteurs). Car certains dispositifs de FDD nécessitent la présence d'informations spécifiques pour être opérationnels. En revanche, l'outil développé peut être adapté à toute conception existante. La phase d'ingénierie amont est constitué d'une étape de conception de règles pour mettre en évidence les défauts. Ces règles peuvent donc être adaptées aux systèmes et capteurs présents ainsi qu'à leur disposition. Cette souplesse induit également la possibilité de créer n'importe quelle règle et donc d'identifier tout défaut ou comportement souhaité. Cette qualité est rarement appréciée dans les autres méthodes de FDD.

Un second avantage découlant de la souplesse de la méthode développée concerne la complexité des défauts à mettre en évidence. Ainsi les défauts à détecter pourront être plus ou moins complexes selon la quantité et la qualité des capteurs installés. Cela induit qu'il n'y a aucune obligation d'ajout de capteurs spécifique pour mettre en place cet outil.

L'outil développé possède également une grande capacité d'évolution et d'adaptation. En effet, les règles sont évolutives et peuvent être actualisées durant la durée de vie de l'outil. Ainsi moyennant un travail d'ingénierie, les règles de l'outil peuvent être modifiées ou réajustées. Cela peut être nécessaire dans le cas de modification des systèmes, de l'utilisation du bâtiment ou des priorités en terme de maintenance. En plus de la forme des règles qui peut être modifiée, leur nombre n'est également pas fixe. Des règles peuvent donc être ajoutées ou retirées en fonction des besoins de détection et de l'évolution de ces besoins.

Les cartes fournissant la représentation du fonctionnement du système sont également adaptatives. Les cartes générées par la méthode de réduction peuvent être réactualisées indéfiniment. Cela signifie que ces cartes peuvent être ré-alimentées par de nouvelles données après un certain temps de fonctionnement. Cela est utile par exemple si des données étaient manquantes. Dans ce cas, ces dernières peuvent être ajoutées sur les cartes, après leur apparition dans le fonctionnement du système. Un avantage plus intéressant encore est un cas où l'apparition d'un nouveau défaut ou situation à mettre en évidence est rencontré. Alors ses données peuvent être utilisées pour régénérer la carte (et possiblement les règles). Ainsi, l'outil sera mis à jour et sera en mesure de détecter, voir diagnostiquer ce nouveau défaut.

La conception de cet outil est décomposée en plusieurs phases (*e.g.* Pré-traitement, Création de carte, Projection en temps réel). Cela permet d'effectuer les phases coûteuses en temps de calcul (mais également d'ingénierie) en amont (Phase de Pré-traitement et de création des cartes). Ainsi, cette décomposition rend possible le traitement des données et leur représentation en temps réel. Ce traitement instantané des données et donc du diagnostic du système permet donc de réduire les temps d'intervention des services d'exploitation et de maintenance. Une intervention plus rapide induisant donc une diminution des pertes, quelles soient énergétiques ou économiques.

Cette décomposition permet également que l'adaptabilité de l'outil (*e.g.* modification des règles ou des cartes) n'impacte pas la détection. Les étapes d'ingénierie amont peuvent être réalisées alors que l'outil fonctionne. Ces dernières n'imposent en aucun cas l'arrêt du dispositif de détection.

De plus, cet outil a été développé pour être orienté utilisateur. Dans cet objectif une méthode de réduction de dimension est utilisée. Les différents états de fonctionnement du système peuvent être représentés sur une carte. Cette représentation en 2D permet une analyse instantanée du système grâce à des espaces attribués aux différents défauts ou fonctionnements nominaux. Aucune analyse

des différentes séries temporelles, complexe et coûteuse en temps, n'est nécessaire. Ainsi, aucune qualification des équipes de maintenance ou d'exploitation n'est requise pour l'utilisation de cet outil. Les données récupérées en temps réel sont donc directement représentées sur la carte. Dès l'apparition du nouveau point les équipes techniques ont un diagnostic et peuvent intervenir en cas de défaut.

Les méthodes de détection de défauts basées sur les données nécessitent des informations pour être opérationnelles. Dans le cadre de la détection de défauts des systèmes de CVC ces informations représentent des données relatives au système suivi. Habituellement au moins une année de données historiques du système est utilisée afin de couvrir tous les fonctionnements. Cette méthode a été développée dans l'ambition de pouvoir être déployée dans bâtiments existants (ayant déjà des données à disposition) mais également dans des bâtiments neufs. Le fait que cette méthode soit également basée sur la connaissance et le développement de règles expertes permet de s'affranchir de l'impératif de posséder des données historiques du système. En revanche, dans le cas des bâtiments neufs pour que la méthode soit mise en place, des données du système devront être générées. La méthode se basant sur des règles expertes de type règle d'analyse fonctionnelle, est fondée sur des conditions de fonctionnement. Ainsi, des données issues de simulations énergétiques dynamiques ou SED (aujourd'hui relativement couramment utilisé en ingénierie) peuvent être utilisées pour entraîner l'algorithme. Dans ce cas, l'outil peut donc être installé et opérationnel dès la mise en service. De plus, les cartes peuvent être mises à jour après la première année de fonctionnement avec les données historiques obtenues.

Néanmoins, cet outil possède également un certain nombre de limitations. Tout d'abord, cet outil peut uniquement être développé en cas d'existence de dispositif de gestion technique bâtiment (GTB) ou du moins de présence d'un certain nombre de capteurs. Sans cette instrumentation minimale, l'outil ne peut pas être opérationnel. Dans un second temps, l'adaptabilité de l'outil au regard de l'instrumentation existante s'accompagne d'une variabilité de la qualité ou de la précision des détections. Bien que l'outil puisse fonctionner avec un nombre restreint de capteurs, la détection peut en revanche se retrouver très limitée. Bien évidemment, plus le nombre de capteurs est important, plus la détection et de surcroît les diagnostics, seront précis.

Une autre limitation de cette méthode concerne le fait qu'elle soit basée sur le savoir expert. Car bien que l'outil permette à terme de fournir des résultats facilement compréhensibles et se passant d'analyses, son élaboration peut s'avérer complexe. La formalisation du savoir expert (*i.e.* l'élaboration des règles) et de la sensibilité de l'outil passe par une phase d'analyse du système et de compréhension des phénomènes physiques et des équations utilisés. Cette étape ne peut malheureusement être effectuée que par du personnel qualifié, ce qui limite la facilité d'implémentation.

Pour finir, ce type d'outil de détection de défaut est difficilement industrialisable. En effet, son adaptabilité et sa souplesse viennent du fait qu'il nécessite une phase d'ingénierie d'amont avant sa mise en place. Ces phases comportent comme il vient d'être énoncé une analyse du système et de son fonctionnement. Ainsi, la phase de *Pré-traitement* de l'ingénierie amont de cet outil dépend entièrement de l'environnement dans lequel il est implémenté. Cet outil doit donc impérativement subir une phase d'analyse afin de pouvoir être développé de façon optimale pour le système sur lequel il est déployé.

L'outil de détection de défauts développé possède donc un certain nombre d'avantages du fait qu'il soit basé à la fois sur les données de mesure et sur l'expertise. Ces avantages peuvent être résumés par les qualités suivantes, souple, adaptable, évolutif, décomposé en plusieurs phases, orienté utilisateur et déployable sur bâtiments neufs comme existants. C'est grâce à ces différents avantages, que l'outil de détection de défauts développé se distingue des autres outils existants. Il permet de lever plusieurs des freins identifiés dans la propagation de ce type de méthode sur le marché. Néanmoins, cet outil de détection de défaut possède également certaines limitations

induites par ses caractéristiques. Par exemple, son adaptabilité et sa souplesse venant de l'existence d'une phase d'ingénierie avant sa mise en place, le rend difficilement industrialisable. Ces phases comportent une analyse du système et de son fonctionnement. Ces dernières sont habituelles dans les missions de Cx diverses et d'implémentation de mesure de conservation d'énergie mais nécessite un main d'œuvre qualifiée.

### 3.4 La méthodologie détaillée

Dans cette section les différentes phases de la méthodologie pour la mise en place et l'utilisation de l'outil sont détaillées.

#### 3.4.1 L'étape de *Pré-traitement*

La phase de *Pré-traitement* peut être décomposée en plusieurs sous étapes. Les différentes sous étapes de la phase de *Pré-traitement* sont présentées dans la Figure 3.12.

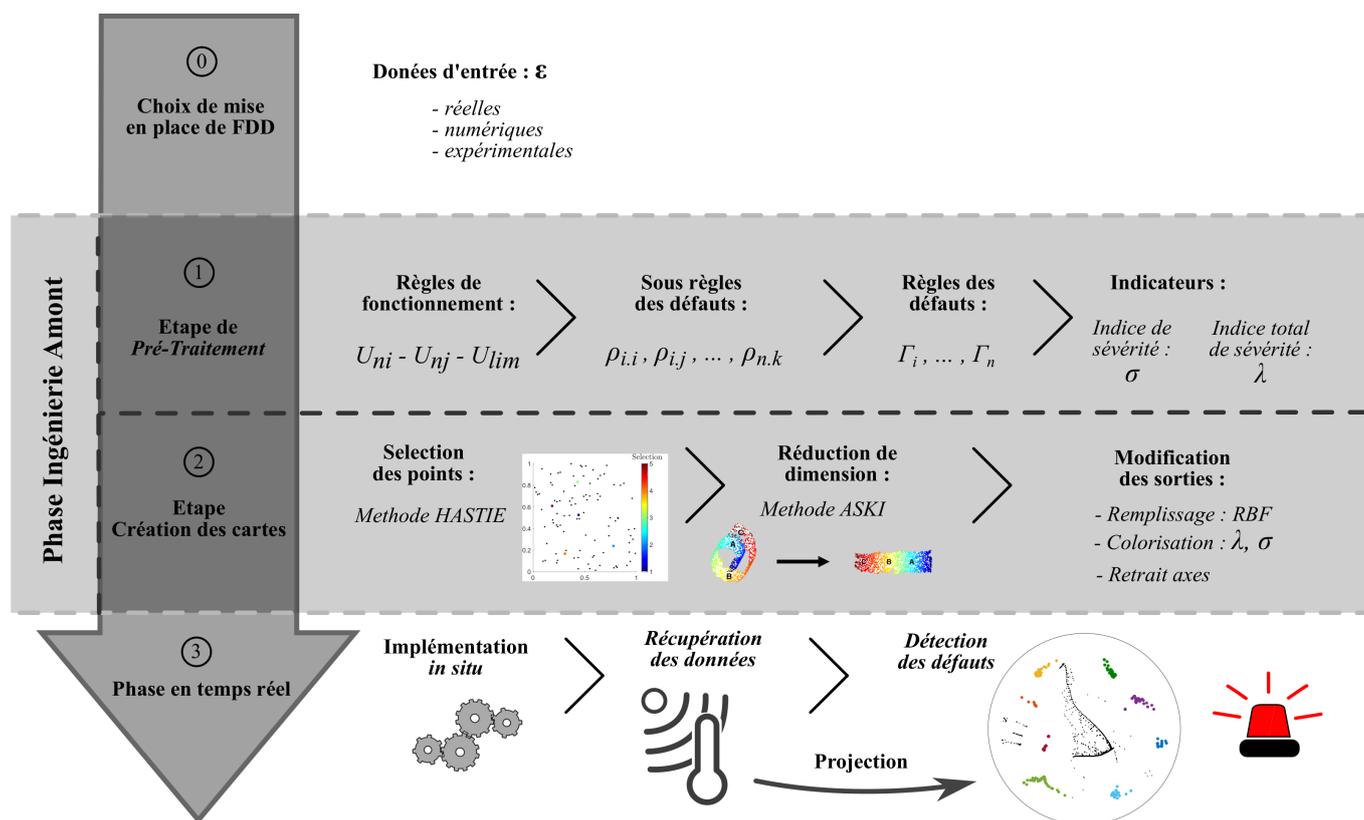


Figure 3.12 – Détail de la Phase de Pré-traitement.

##### 3.4.1.1 Les entrées

Dans cette étape, il doit être défini les entrées qui seront utilisées dans l'outil. Par entrée, on entend les données qui seront utilisées pour entraîner l'algorithme de FDD. Ces données doivent impérativement être de même nature que celles qui seront traitées par l'algorithme lors de son implémentation. Ces données sont déterminées de façon différente selon la mise en place de l'outil.

Dans le cas d'un RCx ou d'un RetroCx, ces données d'entrée correspondent aux points de relevés du système de GTB. Toutes les informations récupérées par le système de gestion du bâtiment peuvent être utilisées comme données d'entrée. Si le système doit être rénové et de nouveaux capteurs doivent être mis en place, ces derniers peuvent être pris en compte.

Dans le cas d'un ICx sur bâtiment neuf, alors les points à prendre en compte sont ceux qui sont spécifiés dans le CCTP de l'ouvrage. Sinon ils doivent être déterminés comme le nombre de point minimal permettant de répondre aux exigences du propriétaire du MOA.

Bien évidemment, deux cas distincts se présentent. Le cas où les données d'entrée existent et sont disponibles (i). C'est le cas lorsque l'outil est mis en place dans un bâtiment comportant déjà une GTB sur lequel aucun nouveau capteur ne sera ajouté. Dans le cas où les données sont disponibles, ces dernières pourront être utilisées pour l'apprentissage de l'outil. Il sera néanmoins nécessaire durant cette phase, de faire appel au personnel de maintenance ou de pilotage/exploitation du bâtiment. Avec eux il sera mis en évidence les périodes durant lesquelles des défauts sont survenus ainsi que leur type. Tous les défauts et leur apparition devront être mis en évidence afin de maximiser la confiance que l'on peut avoir dans ce jeux de données (*Ground Truth*).

Le second cas est celui pour lequel ces données ne sont soit pas existantes soit incomplètes (ii). Par exemple dans le cas d'un bâtiment neuf ou d'un bâtiment sur lequel le système de gestion technique va recevoir une amélioration (ajout de capteurs). Lorsqu'aucune des données d'entrée originaire du bâtiment sont existantes il faudra faire appel à des jeux de données extérieurs. Ces jeux de données peuvent prendre différentes formes. Ils peuvent être des données de référence concernant les fonctionnements de ce système (e.g. référentiel expérimental du Chapitre 2), des données issues d'un bâtiment ayant un système et des conditions d'utilisation similaires (dans le cas par exemple de grand parc de bâtiments), des données issues de la modélisation du système dans ce bâtiment.

Les données d'entrée de l'outil de FDD peuvent être n'importe quelle information concernant l'état de fonctionnement du système pouvant permettre l'identification d'un défaut. Usuellement, ce sont principalement des grandeurs physiques relevées sur le système, concernant son vecteur, ses composants ou leur état (e.g. des températures, des consommations électriques ...).

Les données originales sont définies selon la forme suivante :

$$U = [U_{ni}], \quad (3.9)$$

où  $U_{ni} \stackrel{\text{def}}{=} U_i(t_n)$  représente la quantité mesurée obtenue sous forme d'une série temporelle,  $i \in \{1, \dots, N_m\}$  avec  $N_m$  le nombre total de quantité mesurée et  $n \in \{1, \dots, N_t\}$  avec  $N_t$  le nombre total de pas de temps d'acquisition.

### 3.4.1.2 L'élaboration des règles

Lorsque les données d'entrée sont connues, la seconde étape de la phase de *Pré-traitement* peut être effectuée. Cette étape concerne la formalisation du savoir expert qui est formalisé sous la forme de règles dites expertes. Chacune de ces règles sert à la mise en évidence d'un défaut du système. Ces règles expertes notées  $\Gamma_r$  où  $r \in 1..N_r$  peuvent être constituées de la conjonction ou disjonction de plusieurs sous-règles. Les sous-règles sont obtenues suite au traitement (adimensionalisation) de règles de fonctionnement du système.

Chaque règle experte est ensuite traitée afin d'obtenir un indice de sévérité concernant l'état du système au regard de cette règle. Ces indices de sévérité sont regroupés ensemble pour exprimer l'état du système total.

**Les règles de fonctionnement.** Les règles de fonctionnement du système servent au traitement des données d'entrée. Ce sont des affirmations logiques utilisant les données d'entrée, du même type que celles rencontrées dans les analyses fonctionnelles. Elles correspondent à des états de fonctionnement du système permettant la mise en évidence de défaut. Elles sont créées par l'ingénieur qui met en place la méthode de détection de défaut. Ces règles sont définies comme suit :

$$U_{ni} - U_{nj} = U_{lim}, \quad (3.10)$$

où  $(i, j) \in \{1, \dots, N_m\}^2$  et  $i \neq j$ .  $U_{lim}$  est une valeur limite choisie par son créateur tel que lorsque la différence  $U_i - U_j$  dépasse ce seuil, la situation est considérée comme propice au défaut.

Un total de  $N_R$  sous-règles sont définies et regroupées dans la matrice suivante :

$$\rho = [\rho_{nk}], \quad (3.11)$$

avec  $k \in \{1, \dots, N_R\}$  et  $n \in \{1, \dots, N_t\}$ . Chaque élément de cette matrice est défini par :

$$\rho_{nk} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{U_{ni_k} - U_{nj_k} - U_{lim_k}}{\beta_k}. \quad (3.12)$$

où  $(i_k, j_k) \in \{1, \dots, N_m\}^2$ ,  $i_k \neq j_k$ ,  $k \in \{1, \dots, N_R\}$  et  $n \in \{1, \dots, N_t\}$ . L'élément  $\rho_{nk}$  est à proprement parler une règle experte, mais sera appelé ici sous-règle experte. Le résultat de ces règles logiques est exprimé sous une forme adimensionnel grâce au facteur  $\beta$ . Ce facteur est utilisé comme indicateur de gravité dans le processus de détection du défaut.

Les sous-règles servant à l'identification du même défaut sont ensuite regroupées pour former une règle. Elles sont traitées par des opérateurs logiques afin de mettre en évidence le défaut auquel elles se rapportent. Ainsi il ne reste qu'une règle par défaut. Les sous règles sont ensuite regroupées dans la matrice suivante :

$$\Gamma = [\Gamma_{nl}], \quad (3.13)$$

où  $n \in \{1, \dots, N_t\}$  et  $l \in \{1, \dots, N_d\}$  avec  $N_d$  le nombre total de défaut à mettre en évidence.

Chaque élément de  $\Gamma$  est défini comme suit :

$$\begin{aligned} \Gamma_{nl} &\stackrel{\text{def}}{=} \rho_{ni_u} \wedge \rho_{nj_u} \\ \Gamma_{nl} &\stackrel{\text{def}}{=} \rho_{ni_u} \vee \rho_{nj_u} \end{aligned} \quad (3.14)$$

où  $(i_u, j_u) \in \{1, \dots, N_d\}^2$ ,  $i_u \neq j_u$ ,  $k \in \{1, \dots, N_s\}$  avec  $N_s$  le nombre total de sous règles par défaut. La première equation donne la cas de la conjonction des sous règles et la seconde le cas de la disjonction.

Les résultats des règles  $\Gamma$  sont ensuite traités par une fonction tangente hyperbolique afin de générer un indicateur de sévérité. Cet indicateur de sévérité  $SI$  aussi appelé  $\sigma_{nk}$  est obtenu de la manière suivante :

$$\sigma_{nl} \stackrel{\text{def}}{=} \tanh(\Gamma_{nl}). \quad (3.15)$$

Les indices de sévérité ( $SI$ ) sont ensuite regroupés dans une matrice définie comme suit :

$$\sigma = [\sigma_{nl}], \quad (3.16)$$

où  $l \in \{1, \dots, N_d\}$  et  $n \in \{1, \dots, N_t\}$ . Il peut être remarqué que  $\sigma \in \mathcal{Mat}(\ ]-1, 1[ , N_t, N_R)$ . Pour rappel  $N_d$  est le nombre de règles expertes et  $N_t$  est le nombre de pas de temps mesurés. Les  $SI$  permettent désormais de présenter les résultats de l'Eq. (3.14) sous une forme adimensionnelle

comprise entre  $] - 1, 1 [$  indépendamment de la nature du défaut. La Figure 3.13 donne une représentation des  $SI$  et de la manière dont la lecture doit être interprétée. Le facteur  $\beta$  est donc utilisé pour gérer l'inclinaison de la courbe de l'indice de sévérité.

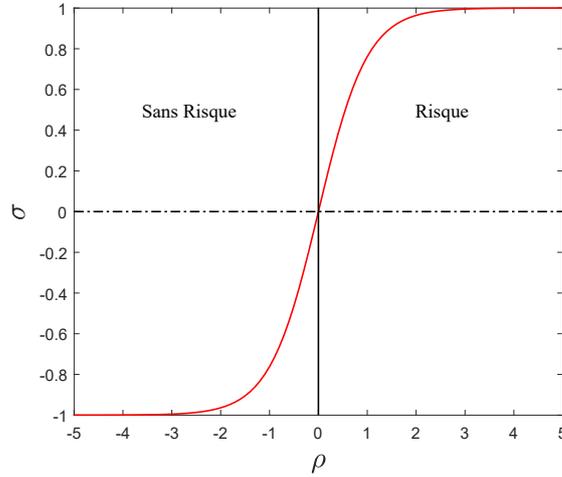


Figure 3.13 – Représentation de l'indice de sévérité (SI).

Un autre indicateur est développé afin de détecter l'apparition de défauts multiples. C'est l'indice total de sévérité appelé  $\lambda$ , il est défini comme suit :

$$\lambda_n \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=1}^{N_R} \sigma_{nl}^+ , \quad (3.17)$$

où  $n \in \{1, \dots, N_t\}$  et

$$\sigma_{nl}^+ \stackrel{\text{def}}{=} \max(\sigma_{nl}, 0). \quad (3.18)$$

Ainsi  $\sigma_{nl}^+$  correspond donc à la partie positive des indices de sévérité, signifiant que le défaut est avéré, comme illustré en Figure 3.13. Le dernier indicateur se rapporte au nombre total de défaut apparaissant simultanément :

$$\delta_n \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{l=1}^{N_R} \chi_{[0,1]}(\sigma_{nl}), \quad (3.19)$$

où  $\chi_{[0,1]}(\bullet)$  désigne la fonction d'indication du sous-ensemble  $[0, 1]$ .

### 3.4.2 L'étape de Création des cartes

Une fois les données pré-traitées, elles peuvent être utilisées comme données d'entrée pour la phase de traitement. Cette phase a pour objectif la réduction de dimension des données d'origine. Cette réduction de dimension est effectuée pour obtenir une représentation en plan (2D) du fonctionnement du système. Cette représentation permet d'apprécier l'apparition et l'identification des défauts. Elle peut être séparée en trois sous-étapes permettant de fournir les cartes du système. Ces étapes sont, (i) la sélection du nombre de points, (ii) la réduction de dimension, et (iii) le traitement des sorties.

### 3.4.2.1 La sélection du nombre de points

Les données d'entrée de la phase de traitement peuvent être extrêmement denses, par exemple entre  $\mathcal{O}(10^4)$  et  $\mathcal{O}(10^5)$  respectivement pour des enregistrements à pas de temps de 15 min et de 1 min. La complexité de l'algorithme utilisé est de  $N_p^2$  avec pour  $N_p$  le nombre de points à représenter. Il est évident que l'utilisation de l'intégralité des données de sortie de la phase de pré-traitement risque de rendre la réduction trop coûteuse en temps de calcul.

Pour résoudre ce problème et représenter les cartes dans un temps plus court, il est choisi d'effectuer un échantillonnage des points. Cet échantillonnage doit permettre de réduire drastiquement le nombre de points du jeu initial tout en conservant un maximum d'information. Cela signifie donc de conserver uniquement les points les plus représentatifs de l'espace d'origine. La méthode de sélection de HASTI a été choisie pour réaliser cet échantillonnage car c'est une méthode ayant prouvé son efficacité [110]. Cette méthode retient les  $N_H$  points minimisant la somme des distances dans l'échantillon,  $N_H \ll N_t$ . A chaque sélection de points, ce dernier est retiré des points pouvant être sélectionnés. Un exemple de résultat de la sélection de cette méthode est présenté en Figure 3.14

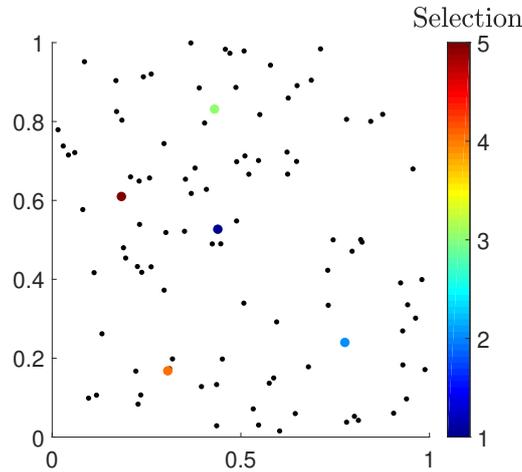


Figure 3.14 – 5 premières sélections selon la méthode HASTI sur 100 points aléatoires.

Grâce à cette méthode les  $N_H$  points exprimant le plus la dispersion du jeu de données initiales sont conservés. Il est assumé que cette sélection représente au mieux l'espace d'origine avec le nombre de points choisis.

### 3.4.2.2 La Réduction de dimension - ASKI

Lorsque les  $N_H$  points les plus représentatifs de l'espace d'origine ont été sélectionnés, l'étape de réduction de dimension peut être effectuée. Comme expliqué précédemment, l'objectif de cette étape est de fournir une représentation (*carte*) de l'espace d'origine dans une dimension appropriée à une analyse visuelle rapide (*i.e.* 2D ou 3D). Dans les cas de détection de défaut appliqués à cette méthode, la dimension de la matrice initiale des données  $U$  est  $[N_t \times N_m]$  où  $N_t$  représente le nombre de pas de temps et  $N_m$  le nombre de données mesurées. Elle est traitée par les règles expertes pour obtenir une matrice de taille  $[N_t \times N_d]$ , où  $N_d$  le nombre de règles (ou de défauts), qui peut être considéré comme la matrice de l'espace d'origine. L'utilisation de la méthode ASKI, privilégiée à la suite de la comparaison effectuée dans la Section 3.2.4, est donc une technique de cartographie

$$f : \mathcal{Mat}([-1, 1], [N_t, N_l]) \longrightarrow \mathcal{Mat}(\mathbb{R}, N_H, N_D), \quad (3.20)$$

qui pour une matrice  $\sigma$  renvoie une nouvelle matrice  $\tilde{\sigma}$  dans une dimension inférieure :

$$f : \sigma \mapsto \tilde{\sigma}, \quad (3.21)$$

Elle permet donc de passer d'une dimension initiale de  $[N_t \times N_d]$  à une matrice de seulement  $[N_H \times N_D]$ . Avec  $N_D$  le nombre de dimensions sélectionnées pour l'espace de représentation (habituellement deux ou trois).

La méthode de réduction ASKI nécessite deux paramètres d'entrée principaux, le nombre de voisins à conserver ainsi que la matrice des distances des points à réduire. La matrice des distances de l'ensemble des points initiaux est de dimension  $[N_p \times N_p]$ ,  $N_p$  étant le nombre de points dans l'espace d'origine. Grâce à l'étape précédente et à la sélection de  $N_H$  points représentatifs, la matrice des distances qui sera utilisée sera une matrice  $[N_H \times N_H]$  avec  $N_H \ll N_p$ . Pour donner un ordre d'idée, dans un cas où les données initiales sont au pas de temps 15 min et où le nombre de points sélectionnés est 1000, comme l'algorithme est de complexité  $N_p^2$ , le temps de calcul est divisé par environ 1200. À titre d'exemple une carte élaborée avec  $N_p \approx 500$  est réalisée en environ 3 min. On constate alors l'utilité de l'étape précédente de sélection de points représentatifs. Un schéma récapitulatif de l'évolution des dimensions des matrices durant le processus de l'outil est proposée en Figure 3.15.

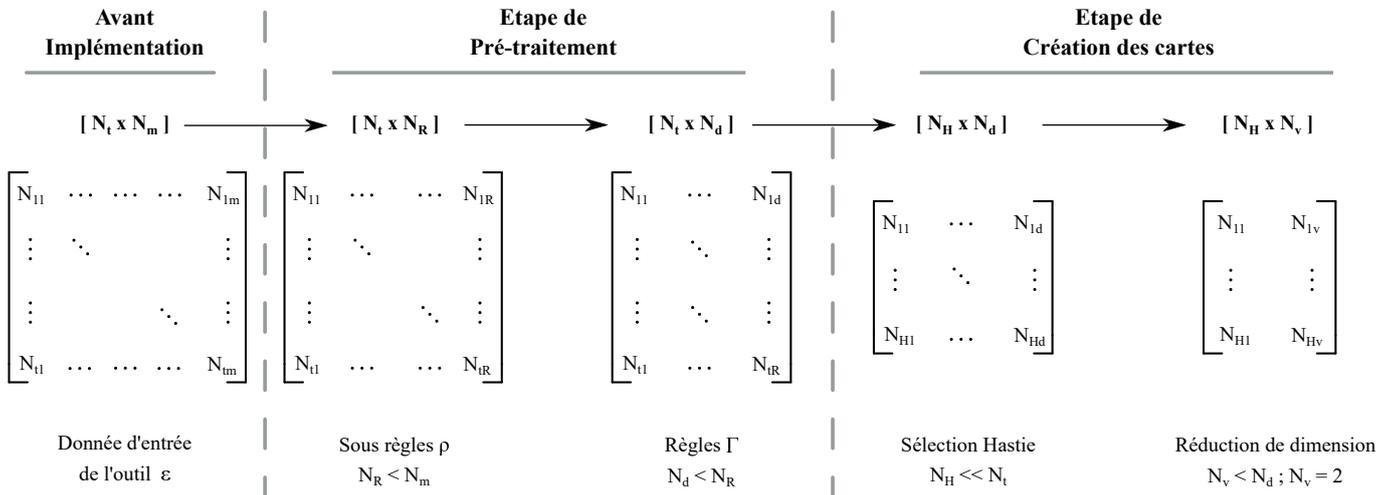


Figure 3.15 – Évolution des dimensions des matrices durant la méthodologie de l'outil.

Concernant la sélection du second paramètre, le nombre de proches voisins, ce dernier doit faire l'objet d'ajustement au cas par cas. L'objectif de cette étape étant la création de cartes visuellement riches, le nombre de voisins conservés doit être ajusté afin d'obtenir un résultat optimal. En augmentant le nombre de voisins conservés, les clusters se trouvent plus isolés et donc distincts. En revanche la dispersion entre les points est moins importante et l'espace de représentation se trouve moins *criblé*. Par opposition, la réduction du nombre de voisins disperse plus les points. Ce phénomène est illustré avec la Figure 3.16. Dans le cadre de cet outil, le choix du nombre de voisins est un paramètre à sélectionner en fonction d'un critère de visibilité. C'est un choix arbitraire que l'ingénieur en charge de l'outil de FDD doit réaliser.

Un autre paramètre influent de la méthode ASKI est le nombre de dimensions de la matrice de sortie. Dans le cadre de cette étude ce paramètre sera fixé à deux car l'outil de détection de défauts cherche à proposer une solution visualisable du résultat. Ce type de réduction est le plus simple à comprendre et analyser pour un opérateur peu habitué à ce genre de représentation.

### 3.4.2.3 Le déploiement de la carte

Les sorties de la méthode de détection de défaut sont donc des coordonnées de points dans un espace en deux dimensions. A ce stade, il est encore nécessaire d'appliquer des traitements afin

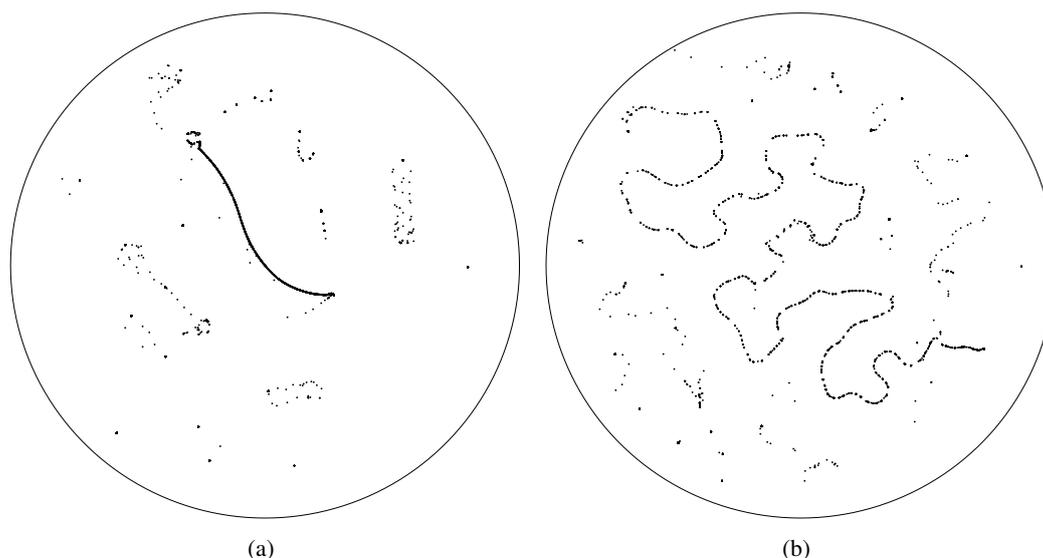


Figure 3.16 – Influence du nombre de voisins conservés cas avec 4 voisins (a) et 64 voisins (b).

de rendre ces cartes utilisables dans un objectif de FDD. Trois opérations principales doivent être réalisées afin d’obtenir les rendus finaux souhaités.

Le premier traitement concerne le *remplissage* de la carte. Pour gagner du temps le nombre de points à réduire a été diminué avec la méthode de HASTI. Les points non sélectionnés (comportant moins d’information) vont désormais être projetés sur la carte établie. Ainsi la carte pourra contenir l’intégralité des données initialement récoltées.

Afin d’effectuer la projection des points initiaux (dimension d’origine), vers l’espace de représentation (2D) la méthode Radial Basis Function (RBF) est utilisée. Cette méthode permet en connaissant les coordonnées des points d’origine et des points de l’espace réduit, de créer une fonction permettant de projeter tous les points de l’espace de haute dimension dans la représentation.

Le second traitement concerne la détection des espaces de représentation des défauts. Dans cette étape les indicateurs développés lors de la phase de *pré-traitement* sont utilisés. L’objectif est de permettre une représentation des différents espaces (*i.e.* nominal est défaillants) sur la carte. Cela est effectué via l’analyse des  $\lambda$  définis à l’Eq. 3.17. Les aires de représentation dont les points possèdent une valeur le  $\lambda = 0$  sont les zones représentant les fonctionnements nominaux. Tous les points ayant une valeur supérieure à 1 sont des défauts et les points avec  $\lambda > 1$  sont des défauts couplés.

Une fois ces zones identifiées, la prochaine opération concerne la mise en évidence des différents défauts. Un traitement (colorisation) est effectué afin de mettre en valeur chaque zone de défaut avec une couleur attirée. Cette étape est effectuée à l’aide des  $\sigma$  calculés durant la phase précédente avec l’Eq. 3.16. Tous points ayant une seule valeur de sigma positive parmi toutes les dimensions est alors considéré comme un défaut dit *unique*. Ces défauts uniques sont alors colorisés en fonction de la dimension d’origine dans laquelle ils possèdent une valeur de sigma positive. Cette étape permet donc la mise en évidence des différents clusters de défauts simple.

La prochaine étape concerne la mise en valeur des défauts couplés. Lors du traitement précédent seuls les points représentant des défauts simples, ont été colorisés. Dans cette opération, les défauts couplant plusieurs défauts sont mis en évidence. Ainsi tous les espaces présents sur la carte sont bien identifiés (*i.e.* nominal, défauts uniques et couplés).

Le dernier traitement est relatif à la réduction de dimension, plutôt qu’à la détection de défaut.

Il concerne la présentation de la carte. En effet, les méthodes de réduction permettent de proposer un espace en  $N$  dimensions "réelles" sur une représentation ( $2D$  ou  $3D$ ). Cette représentation permet via la position des points d'exprimer des relations ou similarités entre ces derniers. En revanche, les axes sur lesquels ces points sont positionnés n'ont plus aucune signification physique réelle. L'affichage de ces derniers n'est pas recommandé car il peut prêter à confusion pour l'utilisation des cartes [36]. Cette méthode de détection étant pensée à destination des utilisateurs finaux (*e.g.* personnel de maintenance ou d'exploitation), non coutumier de ces représentations, il semble indispensable de retirer ces axes. Ainsi leur analyse des résultats ne sera pas faussée par des informations non pertinentes et ils pourront concentrer leur attention sur le reste des informations (la dispersion des points). De cette manière, ils n'auront pas d'analyse par axes, mais une analyse par clusters qui représente les différents fonctionnements du système.

### 3.4.3 Phase en temps réel

À la suite de la phase d'élaboration des cartes l'outil de FDD est prêt. Il peut désormais être implémenté dans le dispositif de GTB recueillant les informations sur le système à surveiller. L'outil de FDD aura alors accès en temps réel aux données du système enregistrées via la gestion technique du bâtiment. Durant cette phase dite d'exécution en temps réel, deux étapes peuvent être identifiées. Il est important de noter que ces deux parties sont réalisées quasi instantanément car elles sont peu coûteuses numériquement.

#### 3.4.3.1 Traitement en temps réel

Lors de l'étape de traitement en temps réel, l'outil de FDD va recevoir les informations concernant le système à chaque relevé de la GTB. Ces informations correspondront aux *entrées* définies dans la phase de *Pré-traitement*. Elles seront alors traitées par les règles expertes afin de fournir un  $\Gamma$  par défauts à détecter. Puis les résultats seront transformés pour obtenir les indices de sévérité et de sévérité totale. Durant cette phase, toutes les étapes présentées dans la section 3.4.1.2 seront exécutées sur les nouvelles données reçues par le dispositif de GTB.

#### 3.4.3.2 Projection en temps réel

Dans la dernière étape de cette phase en temps réel, les données vont être représentées sur les cartes établies lors de l'étape de réduction de dimension. Pour ce faire, les données venant d'être traitées vont être projetées sur les cartes via la méthode Radial Basis Function (RBF), présentée dans la phase de création des cartes en Section 3.4.2. Ces nouvelles données encore en grande dimension, vont être traitées par la fonction générée par RBF sur les données d'entraînement. Une position va alors être attribuée à chaque nouveau point sur les cartes préalablement établies. Cette localisation va être déterminée en fonction de la proximité du nouveau point avec les points sur lesquels la méthode a été entraînée. Les points traités en temps réel correspondent à une représentation du fonctionnement du système et sont appelés *points de fonctionnement*. Une illustration de l'interpolation effectuée par la méthode RBF est présenté en Figure 3.17.

Il en résulte qu'à chaque relevé du dispositif de GTB, un nouveau point de fonctionnement du système est alors représenté sur la carte. Cela permet donc aux équipes d'exploitation et de maintenance d'avoir accès en temps réel à une représentation du fonctionnement du système suivi. Grâce à l'évolution instantanée du point de fonctionnement du système les équipes techniques ont accès directement à un diagnostic du système. Si un défaut survient, il est alors instantanément diagnostiqué et les opérateurs peuvent donc directement intervenir.

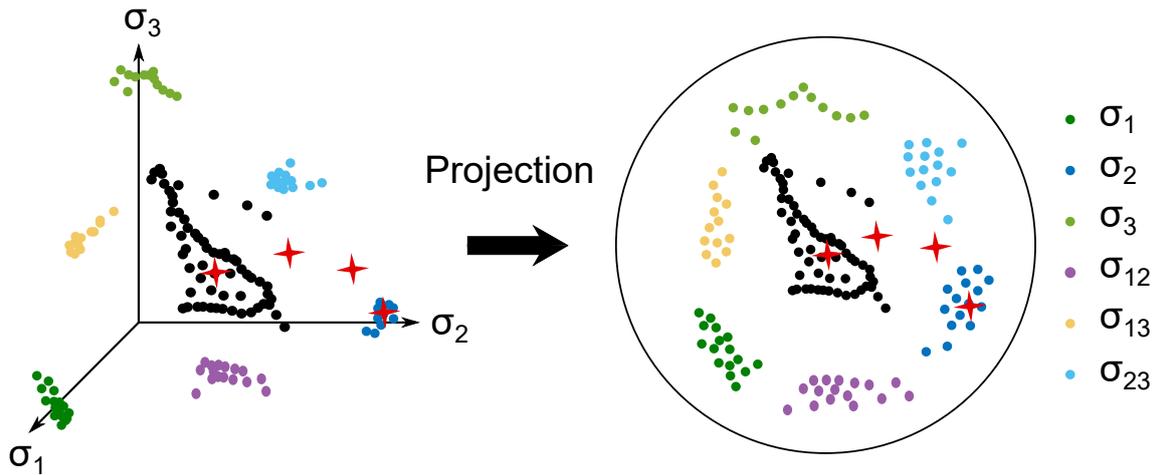


Figure 3.17 – Illustration d'une projection effectuée par la méthode RBF.

### 3.5 Utilisation pratique de la méthode

Dans cette section va être développée comment s'inscrit la méthode dans différentes opérations de bâtiment. Deux cas généraux dans lesquels l'outil développé pourra être implémenté vont être présentés. Cet outil de part sa méthodologie peut être développé et équipé dans le cas de commissionnement initial d'un bâtiment neuf, ou dans le cas retro-commissionnement d'un bâtiment existant.

#### 3.5.1 Sur bâtiment neuf

Cet outil de détection de défaut n'étant pas uniquement basé sur les données mais également sur les règles expertes, il peut être entraîné sur des données n'appartenant pas directement au système étudié. Cela induit qu'il peut être mis en place mais surtout opérationnel dès la livraison du bâtiment. Pour ce faire, le développement de cet outil doit être inséré dans les différentes phases d'une opération de construction. Afin de présenter la mise en place de l'outil dans une construction *idéale* nous prendrons comme situation le cas d'un ICx. Ce type de procédure mettant en avant la coordination et l'échange des différents acteurs afin d'optimiser la réalisation d'un projet de construction est un cas adéquat pour illustrer les interactions entre les acteurs. L'insertion de l'outil dans une mission de ICx est présenté en Figure 3.18. La détection de défaut et le diagnostic des systèmes n'étant pas un lot technique spécifique elle sera considérée comme faisant partie du lot GTC/GTB.

Dans le cas d'une mise en place de l'outil de FDD en ICx, l'inclusion des ingénieurs en charge de la partie Gestion Technique peut être effectuée dès la phase de conception. Lors de la phase de définition ou plutôt de précision des exigences du maître d'ouvrage. En effet, la délimitation et compréhension claire des attentes du futur utilisateur du bâtiment est indispensable. Tant pour déterminer au mieux (pour la suite de la phase conception) les systèmes permettant au mieux de répondre à ces exigences que de pouvoir comprendre l'utilisation qui en sera faite pour en déterminer les possibilités de contrôle.

Une fois le choix des systèmes arrêté, une réunion avec les exploitants, la maintenance, l'AMO CVC ainsi que l'intégrateur peut être tenue afin de déterminer les besoins techniques. Par besoin technique, il est entendu toutes les exigences en terme de suivi du futur du bâtiment, que ce soit technique, énergétique, *etc.* Il est également explicité les attentes en terme de détection de défaut des différents intervenants. Ainsi l'analyse fonctionnelle des systèmes peut être réalisée et les besoins en terme d'instrumentation pour le contrôle et la supervision sont définis.

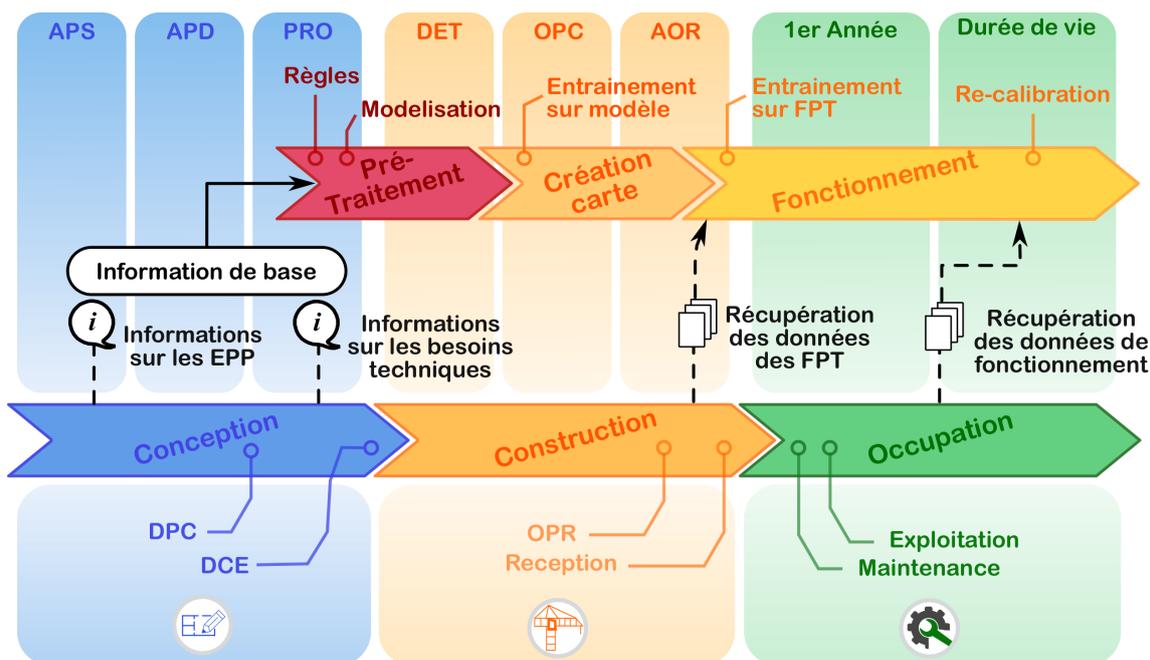


Figure 3.18 – Insertion de la méthode dans une mission de ICx.

Grâce à ces spécifications, les futurs défauts (ou au moins une partie) peuvent être identifiés et les informations à utiliser sont connues. Les phases d'ingénierie amont concernant l'élaboration des règles expertes peuvent alors être effectuées (*Pré-Traitement*). Les données pour entraîner l'outil quand à elles devront être obtenues via une modélisation. Une simulation de type SED du bâtiment, de ses systèmes et de son instrumentation devra être effectuée par l'ingénieur en charge de ce lot (GTB/FDD). La modélisation du bâtiment et du système doit impérativement comporter des fonctionnements nominaux et défectueux pour pouvoir être utilisable. Une fois cette modélisation effectuée (données d'entrée) et les règles expertes définies, l'outil pourra être entraîné sur ce jeu de données. Bien évidemment dans le cas de l'existence de jeux de données de référence concernant ce type de système ces données doivent également être utilisées pour entraîner et valider le développement de l'outil.

Durant la phase OPR, les tests de fonctionnement et de performance (FPT) sont réalisés afin de vérifier que les systèmes livrés fonctionnent correctement et atteignent les performances prescrites en conception. Les FPT des systèmes effectués doivent être enregistrés par le dispositif de GTB [180]. Les défauts créés durant ces tests devront par la suite être utilisés afin de valider expérimentalement les résultats de la modélisation. Ils peuvent également être utilisés pour entraîner l'algorithme de détection s'ils n'ont pas pu être générés par la modélisation. De cette manière la détection comme les diagnostics de la méthode pourront être confirmés. Bien entendu lors de cette phase l'élaboration des documents concernant l'outil de FDD doivent être incorporés dans les documents d'O&M. Ce document explicitera les défauts détectés par l'outil et fournira les équations permettant leur mise en évidence (ainsi que les valeurs de seuil et de centrage). Ce document présentera également les cartes, les zones, ainsi que l'interprétation qui doit en être faite (lecture par cluster et pas par axes). Après cette étape l'outil peut être utilisé de façon fiable dès la livraison du bâtiment.

Une dernière étape importante du processus est celle du re-calibrage de la méthode. A l'issue d'une année de suivi du système au moins, les données réelles du bâtiment peuvent être utilisées pour enrichir les données de l'outil. Grâce à cette méthode l'outil et plus spécialement la carte sera mieux criblée. Un nombre plus important de fonctionnements auront été couverts et l'appréciation

des défauts pourra en être améliorée.

Cette étape pourra également être réalisée de façon ponctuelle, à l'apparition de nouveaux défauts encore inconnus ou situations à mettre en évidence. Les données devront être récupérées et les nouvelles périodes à détecter devront être identifiées. Des entretiens avec les services de maintenance et d'exploitation sont nécessaires afin d'effectuer cette identification et d'y associer un diagnostic. Des nouvelles règles devront bien entendu être générées pour la détection de ces nouveaux défauts.

### 3.5.2 Sur bâtiment existant

Cet outil peut également être incorporé dans un système de GTB sur un bâtiment existant. Dans ce cas, l'outil devra récupérer les données remontées à la GTB pour effectuer les détections et établir ses diagnostics. L'implémentation de l'outil dans le cas d'un RCx ou d'un CCx est présenté de façon schématique dans la Figure 3.19.

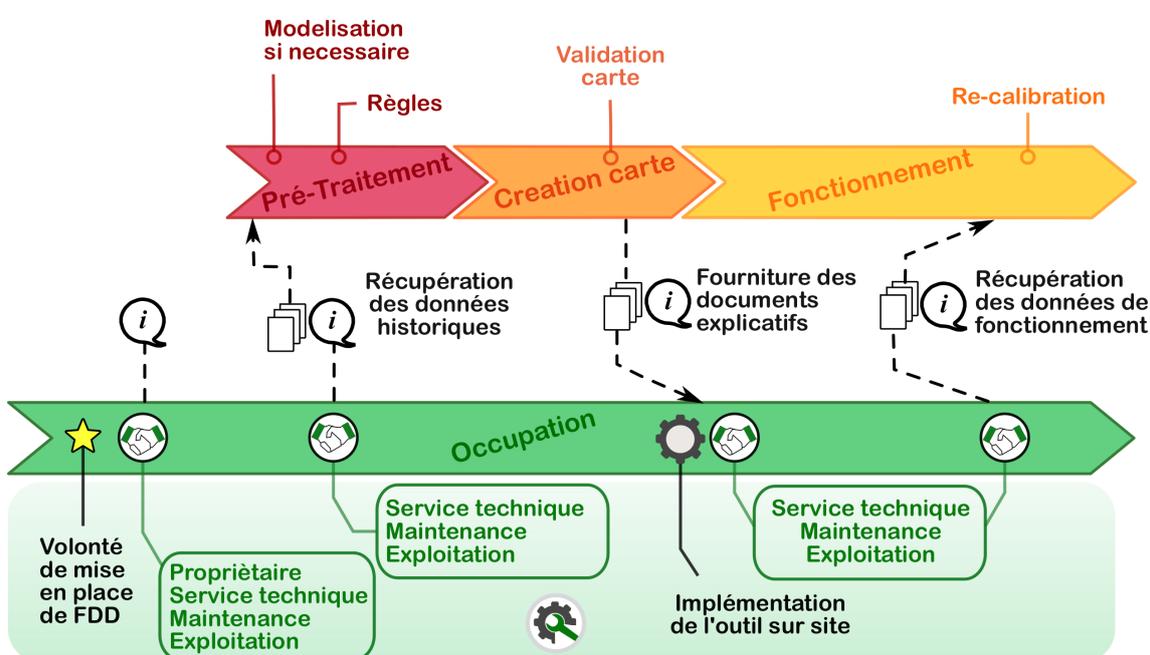


Figure 3.19 – Insertion de la méthode dans une mission de CCx.

Dans la situation d'une volonté de mise en place d'un outil de FDD dans une GTB existante, plusieurs étapes vont se succéder. La première étape concerne une prise d'information initiale. Durant cette étape une réunion devra se tenir avec plusieurs acteurs du bâtiment. Dans l'idéal cette réunion rassemblera le propriétaire (MOA), les services techniques ainsi que les équipes d'O&M. Lors de cet entretien les besoins et attentes de chacun devront être identifiés. Le dispositif de GTB ainsi que les données qu'il recueille devront être étudiés (nombre et nature des données, pas de temps). En fonction des attentes des acteurs et des dispositions du système, une vérification des possibilités sera effectuée. Si aucune détection fiable n'est possible, l'identification des informations nécessaires pour y remédier sera fournie, pour permettre aux acteurs d'effectuer un choix sur les actions à mener.

En cas de volonté et de possibilité d'implémentation de l'outil le processus de création de l'outil peut reprendre. Désormais, seules les équipes techniques sont nécessaires (services techniques, équipes d'exploitation et de maintenance). Les données historiques du bâtiment devront

être récupérées. Au moins une année est nécessaire à l'apprentissage de l'outil. S'il existe plusieurs années, elles seront également récupérées par l'ingénieur en charge de la création de l'outil. Ces données devront être analysées avec les services techniques et les équipes d'O&M pour valider les périodes comportant des défauts (*ground truth* minimale). Une évaluation et une priorisation des défauts devront être effectuées afin d'ajuster la sensibilité de l'outil aux différents défauts. À la suite de ces deux rendez-vous, la création de l'outil peut débuter.

Si certains défauts à détecter ne sont pas présents dans la banque de données, des modélisations peuvent être effectuées pour enrichir les données. Ensuite, le processus de création habituel de l'outil peut être lancé, avec l'établissement des règles et la création des cartes. Concernant la validation des cartes, elle peut être effectuée de plusieurs façons. Si des FPT ou des données de références sont disponibles pour ce système elle peuvent être utilisées. Dans le cas où plusieurs années de données de fonctionnement historiques sont à disposition, ces données sont très utiles. En projetant des données réelles historiques du bâtiment sur les cartes établies on peut directement estimer la qualité des détections de l'outil. Néanmoins, pour cela les défauts doivent avoir été préalablement identifiés et si possible validés (par les équipes techniques). Une attention devra être portée sur le fait que l'utilisation du bâtiment dans les années historiques utilisées doit être similaire à celle du bâtiment actuel.

Une fois la création et la validation de l'outil effectuées, une dernière réunion peut être organisée avec les équipes techniques. Durant cette réunion l'outil sera présenté et les équipes techniques initiées à son utilisation. Les documents techniques relatifs à la méthode contenant les hypothèses, règles, et valeurs des coefficients, seront remis aux équipes pour être ajoutés au manuel d'O&M.

Enfin des re-calibrations de l'outil peuvent être programmées ponctuellement. Ces dernières sont nécessaires dans le cas de l'apparition et l'identification de nouveaux défauts de la part des équipes techniques. Dans ce cas, de nouvelles règles devront être mises en place pour les identifier et les mettre en évidence sur les cartes. Une calibration peut également être envisagée en cas de changement drastique du fonctionnement des systèmes dû à des modifications dans l'utilisation du bâtiment.

## 3.6 Les données d'entrée de l'outil

### 3.6.1 Les différents cas

Généralement, les outils de détection de défauts nécessitent la possession de données d'entrée relatives au bâtiment ou aux systèmes avant l'implémentation. Effectivement, ces données d'entrée vont permettre d'entraîner les outils à détecter les défauts correspondants à ce système.

Il en ressort deux principaux cas, souvent liés au contexte de l'implémentation de l'outil. Dans le premier, le bâtiment existant est pourvu d'un dispositif de suivi. Ce cas est généralement rencontré en commissionnement continu ou en re-commissionnement. Dans ces circonstances, les services techniques possèdent des données historiques du bâtiment. Ces dernières seront alors fournies aux ingénieurs afin d'être utilisées pour l'apprentissage de l'outil. Les données historiques recueillies devront néanmoins subir des vérifications avant d'être traitées par la méthode. Ces vérifications sont de plusieurs nature. Les données devront être examinées pour retirer les erreurs (*e.g.* d'enregistrement, de saturation des capteurs ...) afin d'être idéales pour entraîner l'outil. Mais elles devront également être analysées (en collaboration avec les équipes techniques) afin de mettre en évidence les situations nominales et de défauts. Ainsi le *ground truth* des données sera

établi et elles seront plus fiables.

En revanche, dans le cas de bâtiments neufs, ou existants mais où l'implémentation du système de FDD se fait en même temps que celui du dispositif de suivi, ces bâtiments ne possèdent pas directement de données d'utilisation. Dans ces circonstances, il y a deux solutions principales pour implémenter un outil de FDD. Premièrement, les outils mis en place sont génériques, auquel cas ils n'ont pas forcément besoin d'être calibrés ou entraînés. Dans ce cas ils ne seront pas adaptés de façon optimale au bâtiment et à son utilisation. Seconde solution, les outils seront entraînés sur des données n'appartenant pas réellement au système ou bâtiment sur lequel les défauts vont devoir être détectés. Ainsi on constate que la première solution permet une implémentation plus simple mais non optimisée. La seconde induit un travail préalable à la mise en place de l'outil, mais dont les résultats initiaux ne seront pas forcément optimaux. Les données utilisées pour entraîner l'outil ne lui appartenant pas et leur représentativité n'étant pas connue. Néanmoins, ce manque de fiabilité peut être limité à une courte période. Un outil entraîné sur des données non optimales, pourra toujours être optimisé ou *re-calibré* par la suite sur les données réelles mises à disposition après la première année d'occupation. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à ce type de cas.

Pour répondre à ce besoin en terme de données d'entrée plusieurs solutions sont envisageables. Dans ce cas d'ICx (bâtiment neuf), l'une des mesures possibles serait d'utiliser les données issues des tests de fonctionnement et de performance (FTP) des systèmes pour entraîner les outils. Ainsi, il pourrait être généré des données de fonctionnement du système couvrant le régime nominal, en plus de quelques défauts. Les inconvénients de cette solution sont d'une part la date de livraison du bâtiment qui pourrait ne pas permettre de réaliser ces tests de façon optimale afin de créer les données de base. Par exemple, cela peut être le cas pour la livraison d'un bâtiment en été pour les tests de la chaudière ou du système de traitement d'air en fonctionnement hivernal. D'autre part, il est complexe de réaliser des jeux de données défectueux. Le personnel en charge des FTP n'est pas forcément qualifié pour créer ces jeux et cela pourrait conduire à une détérioration du système. De plus, les tests étant réalisés *in situ* ils ne sont pas réalisés en environnement contrôlé et peuvent se révéler peu fiables. Ainsi avec cette méthode, il peut y avoir au mieux une saison de couverture avec les données issues des tests de fonctionnement. Dans le cas de l'implémentation d'outil de FDD lors de la mise en place d'un système de suivi, l'utilisation de ces données n'est pas possible.

Une seconde option pour la calibration des outils de FDD serait alors d'utiliser comme données d'entrée des données d'un autre système. Néanmoins, ces données doivent absolument être issues d'un système identique, ayant une utilisation similaire, pour être représentatives. Il paraît évident quand on connaît les problématiques de qualité et de récupération des données dans le domaine du bâtiment, que l'utilisation de données réelles n'est pas envisageable ou seulement de la part de grandes sociétés du secteur. Seules les entreprises possédant un parc conséquent de bâtiments peuvent avoir recourt à ce type de méthode pour calibrer les outils de FDD. Le fait qu'il soit très compliqué pour la majorité des entreprises du secteur d'avoir accès à ce type de données rend cette solution peu généralisable. Baser la calibration des outils sur cette méthode induit donc un problème de diffusion.

Une dernière possibilité est d'utiliser des données d'entrée générées numériquement. Néanmoins, ce type de données possède un certain nombre d'inconvénients déjà énumérés dans le Chapitre 2. Cette solution est la plus simple et la plus généralisable. Il est possible de la mettre en place sur tout type de bâtiment et ne demande aucun pré-requis sur la taille de la société. En revanche, l'utilisation de données issues de modélisation ne doit pas être considérée comme optimale. Une étape de vérification des résultats sera donc nécessaire afin de valider la qualité des détectations et diagnostics rendus par l'outil. Cette étape se fera via l'utilisation de données fiables issues du référentiel de comparaison développé dans le Chapitre 2. En pratique ces vérifications pourront être faites avec les résultats issus des différents tests de fonctionnement du système. Ainsi il semble que l'utilisation de modèle numérique du bâtiment soit la solution la plus pérenne dans

le cas de l'ICx, ou plus généralement de manque de données d'entrée de l'outil.

### 3.6.2 Les besoins en termes de données

L'utilisation de modélisations numériques permet de produire des données représentatives du fonctionnement du bâtiment et de ses systèmes. Ces données serviront par la suite à entraîner la méthode de FDD qui sera appliquée sur le bâtiment. Ainsi ces données devront être représentatives de l'utilisation du bâtiment et de ses systèmes au regard des attentes du propriétaire. C'est-à-dire qu'elles devront prendre en compte les besoins sanitaires, les désirs de confort du propriétaire, les objectifs énergétiques et bien sûr les règles de fonctionnement pour les atteindre. Pour cela, une simulation de ces conditions devra être réalisée.

Les logiciels de STD et plus spécialement de SED (au sens de moteur de calcul), permettent de modéliser ces conditions nominales de fonctionnement. Ils permettent de définir un certain nombre de scénarii concernant les conditions intérieures et les règles de contrôle des systèmes permettant de les atteindre. Ainsi, la modélisation des conditions normales d'utilisation est courante et relativement simple à effectuer. Une liste non exhaustive des logiciels propriétaires (interfaces) et moteurs de calcul associés est fournie dans le Tableau 3.1 [6, 47, 71, 98, 103, 136, 151, 157]. Un référencement plus complet de ces logiciels de simulation peut être trouvé dans les travaux de review [68] ou dans les listes fournies par le DOE ou IBPSA [41, 82]. Il est à noter qu'il existe plus de 170 logiciels et outils de modélisation et simulation dans le répertoire *Building Energy Software Tools Directory* d'IBPSA.

Tableau 3.1 – Logiciels de SED.

Moteur de calcul	langage	Interface
EnergyPlus	C++	EnergyPlus Open Studio DesignBuilder
DOE-2	FORTRAN	DOE-2 eQUEST
TRNSYS 18	FORTRAN	TRNSYS
Modelica	Modelica	Modelica
HVACSIM <sup>+</sup>	FORTRAN	HVACSIM <sup>+</sup>
Comfie	Delphi	Pléiades
BBS-Slama	Delphi	ClimaWin

Une modélisation du fonctionnement des situations défailtantes devra également être réalisée afin de pouvoir entraîner les outils à détecter l'apparition des défauts souhaités. La simulation des situations comportant des défauts est en revanche beaucoup plus complexe à réaliser et moins répandue. De plus, peu de logiciels permettent à ce jour de réaliser de la modélisation de défauts des systèmes. La majorité des outils existants considère les systèmes de CVC comme fonctionnant en régime nominal sans l'apparition du moindre défaut. Néanmoins, une petite partie d'entre eux possèdent la capacité de modéliser quelques défauts dans le fonctionnement des systèmes (*e.g.* EnergyPlus, HVACSIM+, Modelica and TRNSYS). La simulation des défauts dans ces logiciels peut être effectuée de deux manières, avec des modèles de défauts disponibles dans le logiciel ou bien par création de modèles de défaut basés sur la physique ou les connaissances expertes du domaine. La modélisation des défauts est aujourd'hui essentiellement utilisée dans les contextes

de tests et d'évaluation des outils de FDD ou pour l'analyse de leurs impacts. Le manque de prise en compte de cette partie de la recherche scientifique de la part des logiciels de modélisation multi-physiques s'explique par la pauvreté de la documentation dans ces deux domaines dans la littérature.

### 3.6.3 Les possibilités en terme de modélisation des défauts

En pratique, les défauts dans les logiciels de simulation énergétique dynamique peuvent être réalisés de plusieurs manières. Certaines créations de défauts sont accessibles dans plusieurs logiciels alors que d'autres ne sont possibles que pour les logiciels possédant des modules spéciaux ou permettant la création de modules. Les approches rencontrées dans la modélisation de défauts sont les suivantes [70] : (1) la modification de paramètres ; (2) la création de modèles ; (3) les modèles existants.

La première possibilité de modélisation de défauts est la modification de paramètres. Avec cette méthode les défauts sont générés en manipulant les données d'entrée du logiciel afin d'induire un comportement défaillant dans le système. Ainsi plusieurs sous-méthodes peuvent être utilisées pour différents types de défauts et en fonction des possibilités permises par le logiciel en question. Les défauts de conception (d'enveloppe comme des systèmes) peuvent être simplement modélisés en forçant certaines valeurs. Ces défauts seront constants durant toute la simulation et ne pourront donc pas apparaître durant cette dernière. Les défauts de dimensionnement des équipements (batteries, ventilateurs, pompes...) peuvent être modélisés en modifiant les valeurs du dimensionnement (puissance, augmentation de la pression, charge manométrique...). De la même façon, les défauts liés à l'enveloppe (via les paramètres de résistance thermique du mur, de perméabilité à l'air) peuvent être modélisés. Cette méthode permet également de générer des soft faults de façon simplifiée, car normalement continus (encrassement de filtre, embouement d'échangeurs, blocage de vannes ou de volets), en modifiant la valeur de paramètres influents (*e.g.* le coefficient d'échange ou encore le rendement).

La seconde possibilité est d'utiliser (ou créer) l'équation physique du modèle pour représenter explicitement les défauts souhaités. Avec cette méthode, les conséquences attendues de la faute ainsi que les équations régissant les comportements des équipements mis en œuvre doivent être connues et comprises du modélisateur. Ainsi, soit un modèle mathématique est développé afin de créer les résultats attendus de l'apparition du défaut, soit le modèle existe et l'évolution des valeurs des paramètres influents est utilisée pour induire les conséquences du défaut dans la simulation. Avec ce type de modélisation, les défauts de type soft fault peuvent être modélisés de façon plus précise que pour le cas précédent (évolution de l'encrassement d'un filtre avec l'augmentation des pertes de charge ou de l'embouement d'un échangeur avec la diminution du transfert thermique...). Dans le cas de cette méthode, les modèles développés peuvent être basés sur des White box (qui s'appuient sur la physique et le premier principe), sur des Grey box (issus de modèles semi-empiriques ou hybrides) ou des Black box (basées sur de la donnée et du machine learning ou des modèles empiriques).

La dernière possibilité de modélisation de défauts est l'utilisation de modules spécifiques existants. En effet, bien que cela soit très rare certains logiciels de simulation proposent un nombre restreint de modèles de défauts (comme HVACSIM+ ou EnergyPlus) [147, 184]. En pratique, ces modèles natifs des logiciels utilisent les deux premières méthodes présentées pour générer les défauts. En revanche, ils peuvent parfois s'avérer plus simple d'utilisation car ils regroupent la majorité des paramètres influents à renseigner pour la modélisation du défaut.

Les différents types de modélisation des défauts présentés dans cette section ne sont pas permis

par tous les logiciels de simulation. L'Annexe C présente le résultat d'un travail d'analyse de la littérature concernant les différents logiciels de simulation permettant la modélisation de défaut. Il ressort de ces travaux d'analyses que le logiciel EnergyPlus est le plus adapté. Une présentation sommaire des possibilités offertes par EnergyPlus est également présentée dans cette Annexe.

### 3.7 Conclusion

Dans ce Chapitre l'outil de FDD développé a été présenté et détaillé. C'est un outil basé sur le savoir expert et l'analyse de données, articulé en deux phases regroupant trois étapes. La première phase, appelée ingénierie d'amont, et composée de deux étapes qui sont le *Pré-Traitement* qui permet la formalisation du savoir expert puis la *Création des cartes* où est effectuée la réduction de dimension. La seconde phase est celle en temps réel, dans laquelle les données sont récupérées, traitées et projetées sur les cartes instantanément pour fournir les diagnostics du fonctionnement du système. Les différentes possibilités d'implémentation de l'outil ont également été mises en évidence pour le commissionnement initial comme continu. Ensuite, afin d'apporter une solution au problème du manque de données essentiellement relatif à l'ICx, plusieurs solutions ont été proposées. La solution la plus viable, consistant à générer des données numériques du système et de son environnement via EnergyPlus, a été retenue pour la suite de l'étude. Une analyse des logiciels permettant de fournir ce type de données a été présentée en Annexe C et EnergyPlus a été sélectionné comme le plus approprié. Pour finir, une présentation des possibilités de modélisation d'EnergyPlus a également été effectuée dans cette Annexe.

Les possibilités d'implémentation sur bâtiment neuf et existant pour l'outil de FDD créé vont être justifiées dans la suite du document. Dans les chapitres suivants, deux études de cas portant sur chacun des deux types de commissionnement vont être présentées.



# 4

## Évaluation de la méthode de FDD sur un cas de commissioning initial

---

---

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>107</b>
<b>4.2</b>	<b>Génération des données numériques</b>	<b>107</b>
4.2.1	L'environnement	108
4.2.2	Synthèse des défauts générés	111
<b>4.3</b>	<b>Exécution de la méthode de FDD</b>	<b>111</b>
4.3.1	La phase de pré-traitement	112
4.3.2	Génération des cartes	119
4.3.3	Finalisation des cartes pour une utilisation par les équipes techniques	125
<b>4.4</b>	<b>Validation expérimentale par projection des données</b>	<b>127</b>
4.4.1	Les résultats expérimentaux	127
4.4.2	Projection des résultats	130
<b>4.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>135</b>

---

## 4.1 Introduction

L'objectif de ce Chapitre porte sur le test de la méthode de FDD développée sur le cas d'un bâtiment neuf dans une mission de commissionnement initial. Comme cela a été mis en évidence dans le Chapitre 3 dans ce type d'implémentation aucune donnée relative au bâtiment n'est disponible. Ces données seront alors générées grâce à une simulation. Le logiciel de modélisation EnergyPlus est utilisé pour la génération des données numériques. Ce dernier a été choisi grâce à ses capacités de modélisation des défauts, comme le travail d'analyse de la bibliographie l'a mis en évidence dans l'Annexe C. Un total de 19 défauts seront générés en deux simulations pour cette étude. Ces défauts comprennent des défauts globaux, d'hiver et d'été.

Lorsque les données d'entrée de l'outil sont générées, la méthode de détection de défaut pourra être exécutée. Les données numériques passeront par l'étape de Pré-Traitement de la méthodologie afin de permettre la mise en évidence des défauts à travers les règles expertes. Puis les résultats seront utilisés pour *entraîner* l'outil de détection de défaut. Ainsi des cartes de fonctionnement du système étudié pourront être élaborées. Une carte sera générée par saison de fonctionnement.

Une fois les cartes de fonctionnement produites, ces dernières seront soumises à une validation. Pour cette étape, les données expérimentales générées au Chapitre 2 pour un système identique à celui modélisé seront utilisées. Ces données contiennent des fonctionnements nominaux et défectueux du système de CTA étudié. Elles sont utilisées pour cette étape de validation car elles ont été obtenues en chambre semi-contrôlée et possèdent donc une grande fiabilité. La projection de ces données expérimentales sera effectuée sur les cartes obtenues lors de la première phase. Ainsi en projetant des données fiables concernant les défauts du système de ventilation, il sera possible d'estimer la qualité de la détection et du diagnostic de l'outil développé. La Figure 4.1 présente une illustration du déroulement des étapes de ce chapitre.

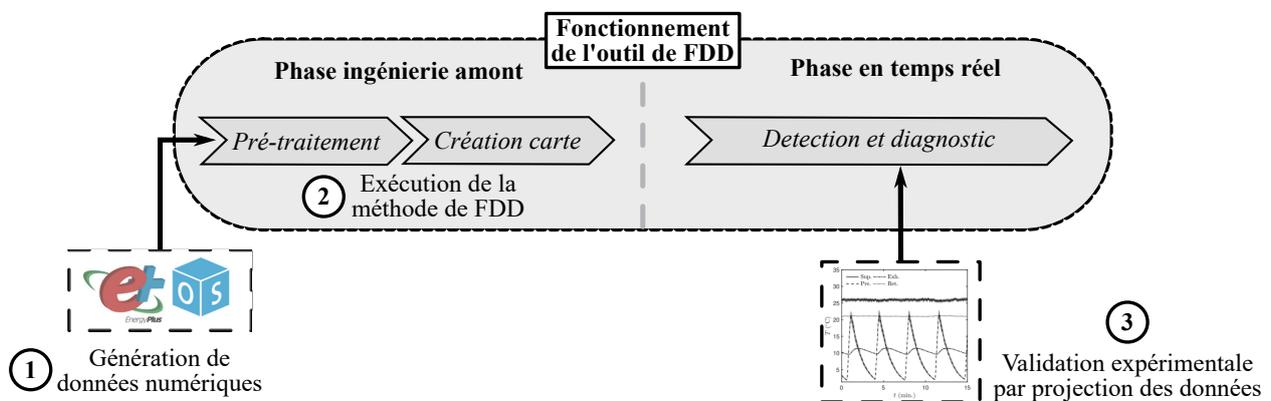


Figure 4.1 – Méthodologie d'évaluation de l'outil de FDD pour le cas d'un commissionnement initial.

## 4.2 Génération des données numériques

Dans cette section sera présentée l'intégralité des cas utilisés pour tester l'efficacité de la méthode de détection de défauts développée sur un cas de ICx d'un système de CTA. Tout d'abord, il sera détaillé l'environnement dans lequel sera testée la méthode, c'est-à-dire le bâtiment et son utilisation. Ensuite les défauts utilisés pour tester la méthode seront présentés et leur modélisation sera explicitée. Pour finir les résultats de la simulation seront analysés afin de s'assurer de la qualité de la modélisation afin de servir de *ground truth*.

## 4.2.1 L'environnement

Dans le cadre de cette étude il a été choisi de modéliser un bâtiment tertiaire de petite taille. Ce choix a été fait car ce type de bâtiment est peu traité par la communauté d'AFDD bien qu'il représente un potentiel significatif et un marché intéressant [59]. Cette modélisation se base sur un projet privé réel implanté dans la zone géographique Grand Sud-Ouest français. Pour la création de cette simulation les pièces du dossier de construction (*e.g.* CCTP, plans d'EXE, chiffrage de l'économiste...) ont été utilisées afin d'être le plus fidèle possible à la réalité.

### 4.2.1.1 Le bâtiment

La construction modélisée est un bâtiment de bureaux sans accueil de public (*i.e.* société d'ingénierie, profession libérale ...) dont la livraison a été effectuée en 2009. Le bâtiment est implanté dans une zone urbaine mixte et présente peu de masques solaires environnants. Ces bureaux occupent environ 200 m<sup>2</sup> répartis sur deux niveaux. La façade principale du bâtiment (entrée) est orientée Nord. La construction géométrique du bâtiment est réalisée avec le logiciel SketchUp Make licence 2017. Une présentation 3D du bâtiment est disponible dans la Figure 4.2.

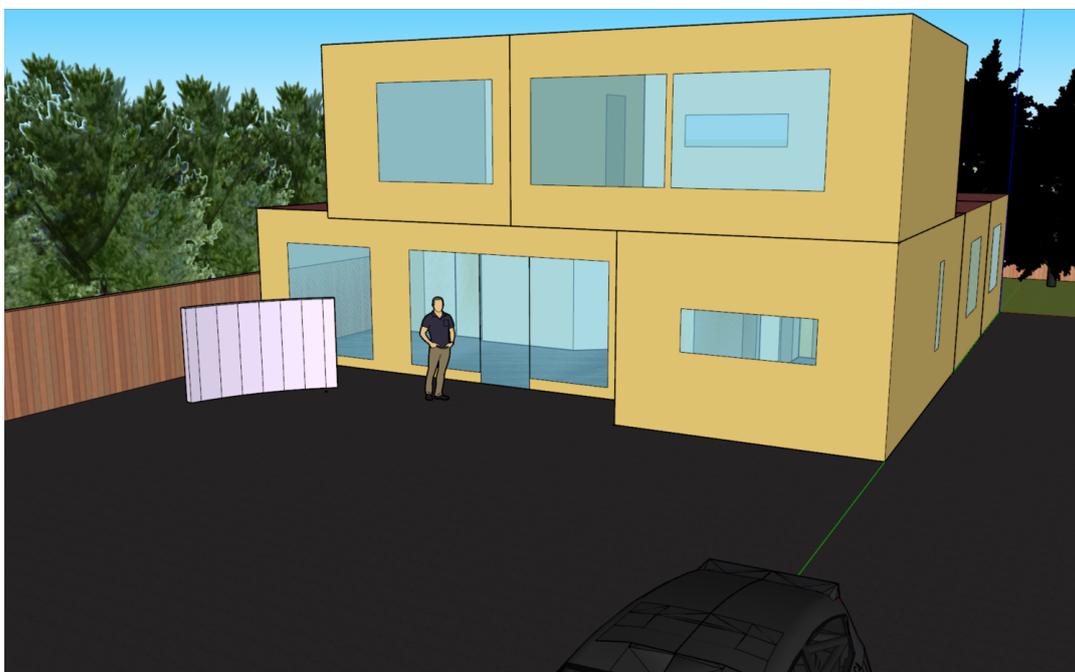


Figure 4.2 – Modèle 3D du bâtiment dans son environnement.

L'environnement dans cette zone est de type *cfb* selon la classification de Köppen [140] ce qui signifie que le bâtiment est placé dans un climat tempéré chaud sans saison sèche. Cet environnement peut être directement comparé aux climats de type 3C et 4C (respectivement représentatif des villes de San Francisco et de Seattle) selon les recommandations climatiques de l'ASHRAE [28]. Pour la modélisation il a été utilisé les données climatiques du chef-lieu de la région Nouvelle Aquitaine, Bordeaux. Les fichiers utilisés sont des données météorologiques *typiques* (IWECC) construits sur 18 années de fichiers météo à pas de temps horaire, convertis au format EPW [44].

Le bâtiment respecte la Réglementation Thermique en vigueur à l'époque la RT2005. La construction, répartie sur deux niveaux, possède une forme concave au rez-de-chaussée. Les principales parois du bâtiment possèdent une construction permettant d'atteindre une résistance thermique surfacique de  $R = 0.85 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  pour les surfaces verticales,  $R = 2.25 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  pour les planchers sur terre plein et  $R = 3.40 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  pour les toitures terrasse. Le RDC

comporte les bureaux, les archives, la reprographie, une salle d'attente et un accueil sur plus de 160 m<sup>2</sup>. L'étage accueil un espace privé sur environ 40 m<sup>2</sup>. Le bâtiment est décomposé en trois zones thermiques : (i) une zone thermique *bureaux*, (ii) une zone thermique *accueil* et (iii) une zone thermique *privé*. La zone thermique *bureaux* regroupe l'intégralité des bureaux du bâtiment. Conformément aux prescriptions du Règlement sanitaire départemental type (RSDT) en vigueur pour ces types de locaux, chacun des bureaux reçoit un débit de renouvellement d'air hygiénique de 25 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. La zone thermique *privé* regroupe tout le premier étage. Un débit d'air de 30 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> y est assuré car elle abrite une salle de repos servant également de salle à manger. La zone *accueil* comporte toutes les autres pièces du bâtiment, principalement l'accueil, la reprographie et les WC. Elle possède un débit de renouvellement d'air de 182 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Le volume de ces zones est 634 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> induisant donc un taux de renouvellement d'air moyen de 0.49. Un plan de masse du bâtiment est fourni en Figure 4.3.

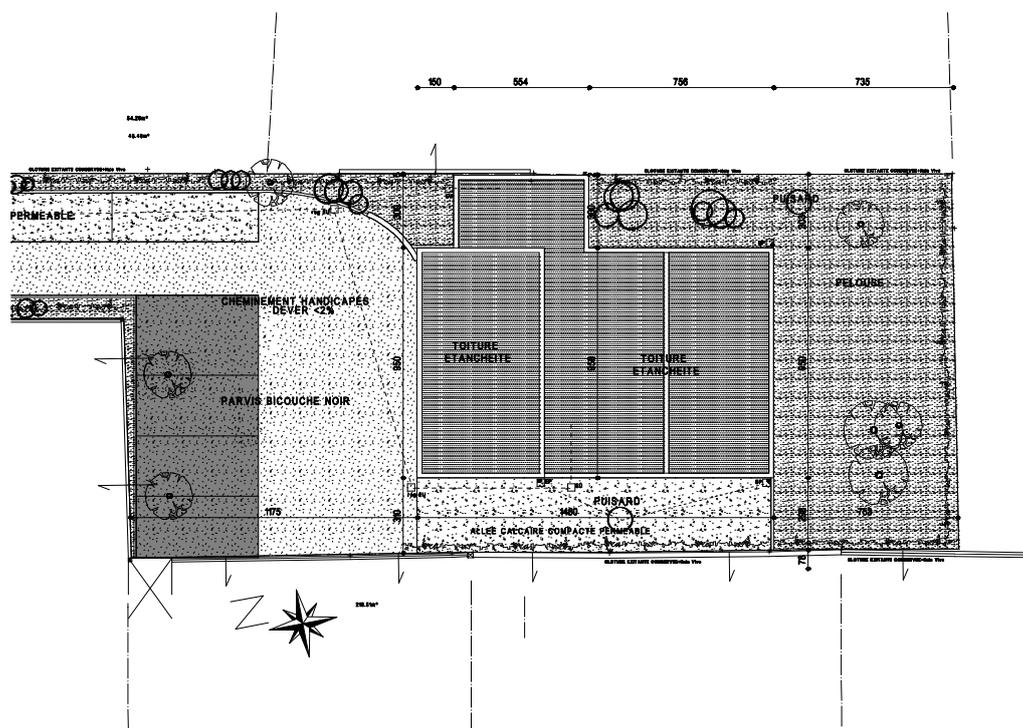


Figure 4.3 – Plan de masse du bâtiment.

Le bâtiment est occupé par des professionnels de 8h00 à 20h00 du lundi au vendredi, avec une occupation réduite le samedi. Des clients se relaient dans la salle d'attente et dans les bureaux durant la semaine de 9h00 à 19h00. Les apports internes considérés par la présence humaine se basent sur les préconisations de la norme Allemande DIN 33403 [38, 72]. Les scénarii d'usage utilisés sont de type déterministe. Des apports internes relatifs aux éclairages et aux appareils utilisés, ont aussi été pris en compte. Ils sont soit conformes à ce qui a été mis en place s'ils appartiennent à ce qui a été défini dans le marché (éclairage) soit aux préconisations du standard 189.1 de l'ASHRAE concernant les apports internes par type de bâtiments [141].

#### 4.2.1.2 Les systèmes

Le maintien des conditions intérieures est assuré par deux types de systèmes distincts, un système de ventilation mécanique contrôlé de type CTA, ainsi que par des émetteurs de chaleur dans les différentes pièces. Les émetteurs de chaleur ont été dimensionnés d'après les calculs de déperdition des zones. Ils sont de type panneaux radiants électriques.

Le système de ventilation utilisé pour traiter l'air du local est identique à la CTA étudiée dans

le Chapitre 2. Cette centrale est présentée dans les Figures 4.4 selon la représentation de OpenStudio et celle d'EnergyPlus Line Diagram. Ces deux logiciels de simulation utilisent la même convention de représentation en ce qui concerne les systèmes. Ces derniers sont divisés en deux boucles théoriques, la partie *besoin* et la partie *fourniture* [42]. Pour être consistant avec ces Figures, c'est également sous cette convention que le système sera présenté par la suite.

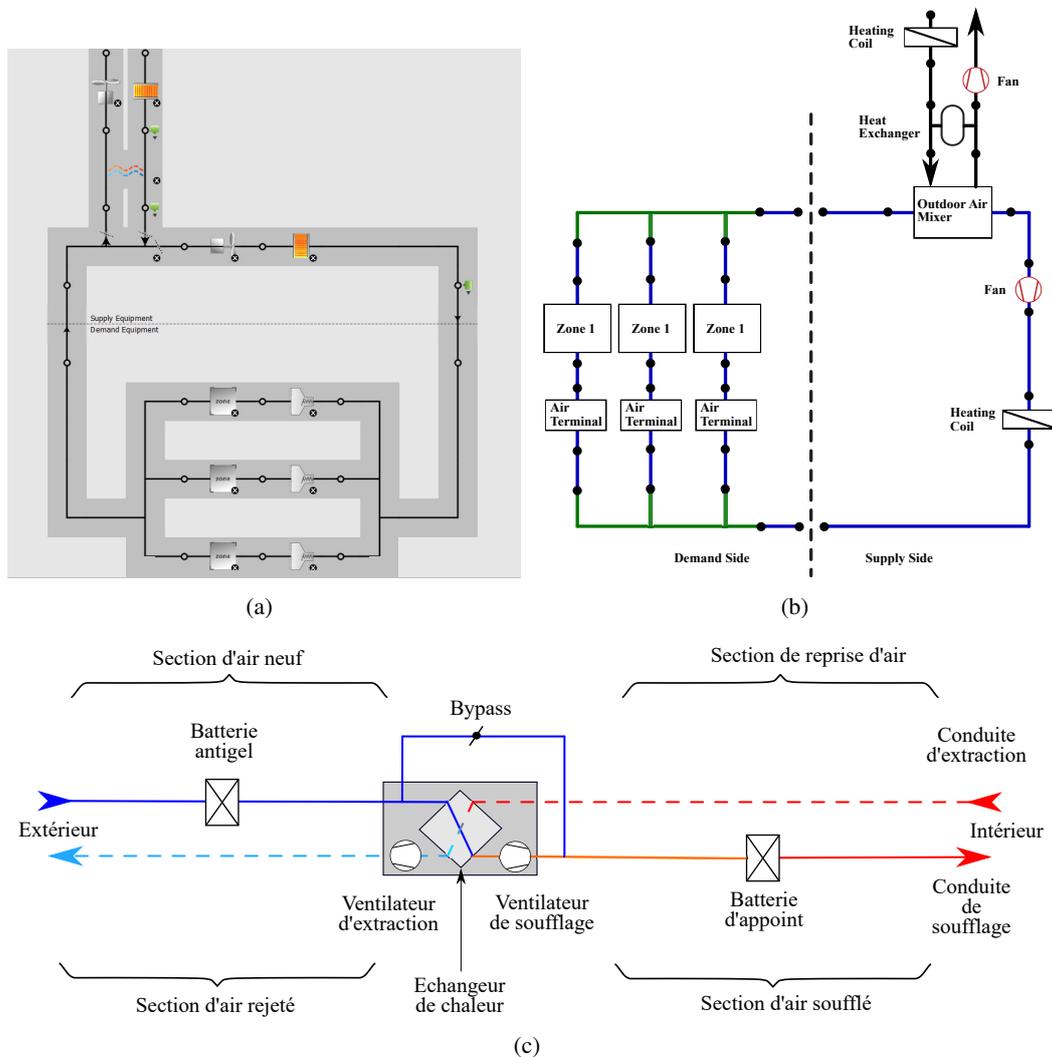


Figure 4.4 – Schémas de la CTA en représentation OpenStudio (a), EnergyPlus (b) et schéma de principe.

La partie *besoin* correspond à la portion abritant les charges (en cas de climatisation) ou les besoins (en cas de chauffage). Elle comprend donc les différentes zones thermiques mais également les éléments de distribution et une partie des réseaux (à partir des tés de séparation des branches pour les différentes zones). La partie *fourniture*, quant à elle comprend tous les éléments de traitement de l'air et de mise en circulation. Ce système est donc composé en partie *fourniture* d'une batterie de préchauffage (*i.e.* antigel) placée directement sur l'arrivée d'air extérieur. L'air préchauffé est ensuite introduit dans un système de récupération d'énergie de type échangeur de chaleur à plaque. À la sortie de l'échangeur l'air passe par un caisson de mélange. Cet équipement a été ajouté par rapport au système étudié dans le Chapitre 2 par contrainte de construction dans EnergyPlus. En effet, EnergyPlus ne permet pas la mise en place d'échangeur sans la présence de caisson de mélange. Néanmoins, ce système est réglé pour fonctionner en tout air neuf comme

le système étudié précédemment. Ainsi cet équipement est uniquement présent pour la modélisation du système mais n'a aucune fonction (son volet est fermé à 100%). À la sortie du caisson de mélange se trouve le ventilateur de soufflage puis la batterie d'appoint. À la suite de la batterie d'appoint l'air passe donc de la partie théorique *fourniture* pour rentrer dans la partie *besoin*. Cette partie donne directement sur un té de séparation (*splitter*) qui va créer trois branches. Chacune de ces branches alimente une zone thermique spécifique. Les trois sections sont composées d'un diffuseur d'air, d'une zone thermique puis d'une bouche de reprise d'air. Les trois tronçons se rejoignent dans un té de mélange (*mixer*) puis repartent dans la partie *fourniture*. L'air retourne donc dans le caisson de mélange, puis passe par l'échangeur. Après l'échangeur se trouve le ventilateur d'extraction qui va envoyer l'air vicié à l'extérieur.

La batterie antigel est modélisée avec une température de consigne fixée à 5 °C afin de pouvoir éviter tout risque de condensation dans l'échangeur à plaque. L'échangeur à plaque est quant à lui modélisé avec un bypass et une température de consigne variable en fonction de la saison. Ainsi la température de sortie de l'échangeur est comparée à la consigne pour déterminer si l'échangeur doit être bypassé ou non. Un EMS a également été développé sous ERL afin de permettre aux ventilateurs de passer en grande vitesse lors de l'activation du bypass pour le rafraîchissement passif. La température de soufflage possède une température de consigne variable entre l'été et l'hiver avec des réduits nocturnes.

#### 4.2.2 Synthèse des défauts générés

Pour l'étude du fonctionnement de l'outil de détection de défaut développé, plusieurs défauts ont été générés. L'étude porte sur un cas de commissionnement initial, donc d'un bâtiment ne disposant pas de données. Les défauts ont donc été modélisés numériquement sur le logiciel EnergyPlus afin d'être cohérent avec une démarche d'ICx. En plus des conditions nominales, un total de 19 défauts ont été modélisés au travers de deux simulations, une pour chaque saison. Ces défauts comprennent 6 défauts globaux (présents dans les deux simulations), 4 défauts d'hiver et 3 défauts d'été. Les défauts globaux comprennent la panne des ventilateurs de soufflage, d'extraction et leur panne simultanée, ainsi que la rupture de la courroie du ventilateur de soufflage, d'extraction et l'encrassement de filtre. Les défauts hivernaux sont la panne de la batterie antigel et celle de la batterie d'appoint, les problèmes de régulation de la batterie antigel et de la batterie d'appoint et la panne simultanée des équipements (ventilateurs et batteries). Les défauts d'été sont trois problèmes liés aux situations de *free cooling*. L'intégralité de ces défauts est présentée sous forme d'arbre dans la Figure 4.5 et leur modélisation est détaillée en Annexe D. Cette Annexe présente également une analyse de ces résultats fournissant un *ground truth* de ces données numériques.

Les simulations effectuées par EnergyPlus constituent les données d'entrée de la méthode de FDD. C'est sur ces dernières que l'outil va être entraîné. Désormais la phase d'ingénierie amont de la méthode de détection de défaut peut être effectuée.

### 4.3 Exécution de la méthode de FDD

Dans cette section sont présentés les paramétrages effectués ainsi que les résultats obtenus par l'outil de détection de défaut développé. Il a été choisi de réaliser deux cartes pour le système étudié. Ce choix a été fait car le système possède deux types de fonctionnement dépendant de la saison. Une carte a été générée par saison pour regrouper les défauts pouvant apparaître durant la saison concernée et les défauts globaux. Cela permet d'optimiser la place sur les espaces de représentation en évitant de présenter des défauts ne pouvant pas apparaître. Cela offre également

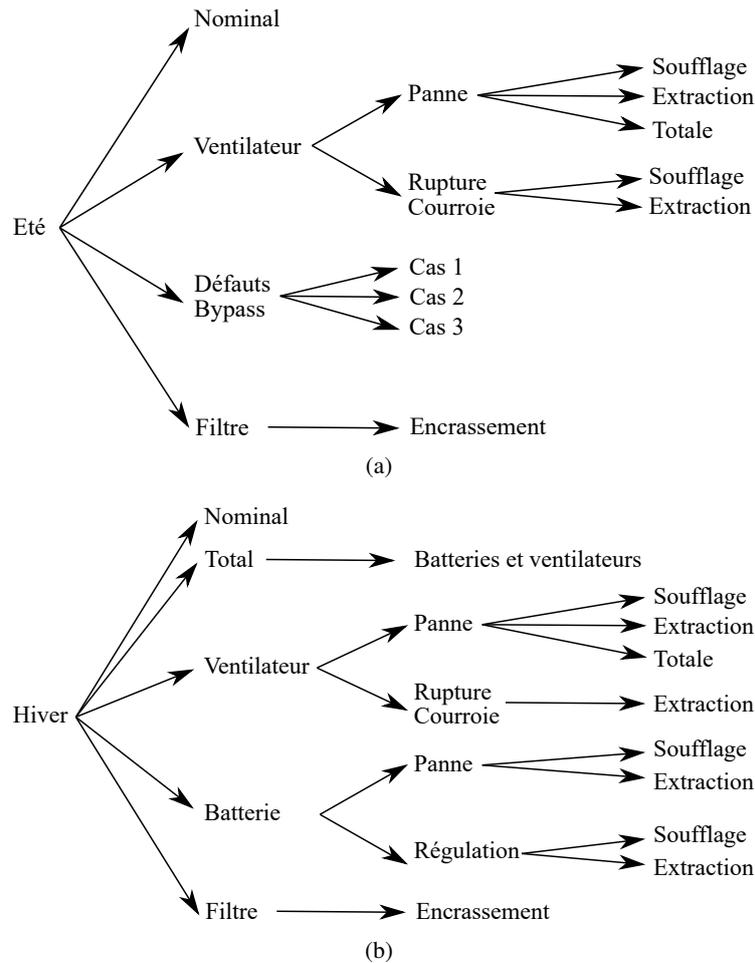


Figure 4.5 – Arbre des défauts numériques réalisés durant la saison d’été (a) et d’hiver (b).

la possibilité de simplifier le travail des équipes de pilotage ou de maintenance.

Chacune des cartes présentées a été réalisée sur une simulation complète. Seule la saison concernée a été traitée par l’algorithme de FDD pour des raisons de densité des données à traiter. Les cartes ont été réalisées sur au moins 500 points sélectionnés par la méthode d’HASTIE. Si nécessaire, quelques points supplémentaires représentatifs ont été sélectionnés, si le résultat de la méthode d’HASTIE n’est pas satisfaisant.

### 4.3.1 La phase de pré-traitement

Les données de sortie des modélisations EnergyPlus ont subi un pré-traitement avant d’être réduites. Pour chacune des modélisations le pré-traitement concerne une phase d’extraction, de mise en forme des données ainsi que l’analyse des données par les règles expertes.

Le traitement des données concerne des grandeurs comme les puissances de certains équipements et les débits. Cette phase est effectuée afin de regrouper des données devant représenter un même élément mais ayant été modélisées avec des *objets* différents, comme les débits d’extraction lors des pannes de ventilateur de soufflage. La phase de mise en forme des données est effectuée pour les deux simulations sur les données le nécessitant. Ces traitements sont effectués par le biais de règles logiques et d’emplois du temps.

La seconde partie du pré-traitement est une étape à part entière de la méthodologie de la méthode de FDD. Elle concerne l’élaboration des règles expertes permettant la détection et le diagnostic des défauts. Cette étape en revanche, est effectuée distinctement pour les deux modé-

lisations. Les défauts présents durant les deux saisons étant différents, les règles créées pour les mettre en évidence sont donc différentes.

#### 4.3.1.1 Pré-traitement de la saison d'hiver

Les règles expertes créées afin de mettre en évidence les défauts hivernaux sont présentées dans cette section. Chaque règle ( $\rho$ ) sert à détecter un des  $i$  défauts. Les règles seront donc appelées  $\rho_i$  afin d'indiquer le défaut auquel elles se rapportent. Chaque règle  $\rho_i$  peut être composée de  $j$  sous-règles afin de détecter efficacement le défaut. Les sous-règles seront donc référencées de la façon suivante  $\rho_{i,j}$  afin de permettre une identification rapide.

Les défauts à détecter en saison d'hiver sont au nombre de huit. Ils sont tous au moins composés de deux sous-règles. Le Tableau 4.1 présente les défauts d'hiver, leurs règles et sous-règles. Pour rappel,  $U_{lim}$  correspond au seuil d'apparition du défaut et  $\beta$  au coefficient de pondération d'apparition du risque.

Tableau 4.1 – Défauts d'hiver et leurs règles.

Défauts	Règles	Sous-règles	$U_{lim}$	$\beta$
Panne ventilateur soufflage	$\rho_1$	$\rho_{1.1}$	-0.05	0.01
		$\rho_{1.2}$	-2	0.1
Panne ventilateur extraction	$\rho_2$	$\rho_{2.1}$	-0.05	0.01
		$\rho_{2.2}$	-2	0.1
Panne de la batterie antigel	$\rho_3$	$\rho_{3.1}$	-2.5	1
		$\rho_{3.2}$	-5	1
Panne de la batterie d'appoint	$\rho_4$	$\rho_{4.1}$	-2.5	1
		$\rho_{4.2}$	1	1
Rupture courroie extraction	$\rho_5$	$\rho_{5.1}$	-0.05	0.01
		$\rho_{5.2}$	30	1
Défaut de régulation PID antigel	$\rho_6$	$\rho_{6.1}$	-5	1
		$\rho_{6.2}$	2.5	1
		$\rho_{6.3}$	10	1
		$\rho_{6.4}$	0	0.1
Défaut de régulation PID appoint	$\rho_7$	$\rho_{7.1}$	0	1
		$\rho_{7.2}$	2.5	1
		$\rho_{7.3}$	10	1
		$\rho_{7.4}$	0	0.1
Encrassement	$\rho_8$	$\rho_{8.1}$	-0.1036	0.015
		$\rho_{8.2}$	40	2.5

**Règle  $\rho_1$  : panne du ventilateur de soufflage.** La panne du ventilateur de soufflage est mise en évidence par deux sous-règles. La première sous-règle  $\rho_{1.1}$  permet de détecter si le débit chute

à une valeur quasi-nulle. La seconde sous-règle  $\rho_{1.2}$  s'assure que la puissance consommée par le ventilateur est inférieure à une valeur choisie.

$$\rho_{1.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{1.1} - Q_{v,sup} - (-Q_{\infty 1.1})}{\beta_{1.1}} > 0. \wedge \rho_{1.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{1.2} - P_{v,sup} - (-P_{\infty 1.2})}{\beta_{1.2}} > 0. \quad (4.1)$$

où  $Q_{1.1}$  et  $P_{1.2}$  sont égales à 0,  $Q_{v,sup}$  et  $P_{v,sup}$  sont respectivement le débit dans la gaine de soufflage et la puissance consommée par le ventilateur de soufflage. Les paramètres  $Q_{\infty 1.1}$  et  $\beta_{1.1}$  valent respectivement  $-0.05$  et  $0.01$  et  $P_{\infty 1.2}$  et  $\beta_{1.2}$  prennent les valeurs  $-2$  et  $0.1$ .

**Règle  $\rho_2$  : panne du ventilateur d'extraction.** La panne du ventilateur d'extraction est également composée de deux sous-règles. Elles sont identiques à celles de la panne du ventilateur de soufflage, sauf qu'elles s'appliquent au débit et à la puissance du ventilateur d'extraction.

$$\rho_{2.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{2.1} - Q_{v,exh} - (-Q_{\infty 2.1})}{\beta_{2.1}} > 0. \wedge \rho_{2.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{2.2} - P_{v,exh} - (-P_{\infty 2.2})}{\beta_{2.2}} > 0. \quad (4.2)$$

avec pour  $\rho_{2.1}$ ,  $Q_{2.1} = 0$ ,  $Q_{v,exh}$  le débit d'air dans la gaine d'extraction,  $Q_{\infty 2.1} = 0.05$  et  $\beta_{2.1} = 0.01$ . Dans  $\rho_{2.2}$ ,  $P_{v,exh}$  la puissance consommée par le ventilateur d'extraction,  $P_{2.2} = 0$ ,  $P_{\infty 2.2} = 2$  et  $\beta_{2.2} = 0.1$ .

**Règle  $\rho_3$  : panne de la batterie antigel.** La détection de ce défaut est composée de deux sous-règles. La première sous-règle utilise la puissance de l'équipement et sa valeur de consommation de veille pour détecter un fonctionnement. La seconde se sert de la température extérieure afin de vérifier s'il a un besoin de préchauffage de l'air.

$$\rho_{3.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{3.1} - P_{b,fro} - (-P_{\infty 3.1})}{\beta_{3.1}} > 0. \wedge \rho_{3.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{3.2} - T_{out} - (-T_{\infty 3.2})}{\beta_{3.2}} > 0. \quad (4.3)$$

avec  $P_{3.1} = 0$ ,  $P_{b,fro}$  la puissance utilisée par la batterie antigel,  $P_{\infty 3.1} = 2.5$  et  $\beta_{3.1} = 1$ . Pour la seconde sous règle de  $\rho_3$ ,  $T_{3.2} = 0$ ,  $T_{out}$  est la température extérieure,  $T_{\infty 3.2} = 5$  et  $\beta_{3.2} = 1$ .

**Règle  $\rho_4$  : panne de la batterie d'appoint.** Ce défaut étant du même type que le précédent, il est également détecté à travers deux sous-règles de même forme. La première en charge de vérifier la consommation de la batterie. La seconde vérifie que la température de soufflage correspond à la température de consigne fixée par l'emploi du temps.

$$\rho_{4.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{4.1} - P_{b,hc} - (-P_{\infty 4.1})}{\beta_{4.1}} > 0. \wedge \rho_{4.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{c\,sup} - T_{sup} - T_{\infty 4.2}}{\beta_{4.2}} > 0. \quad (4.4)$$

où  $P_{4.1} = 0$ ,  $P_{b,hc}$  est la puissance absorbée par la batterie d'appoint,  $P_{\infty 4.1} = 2.5$  et  $\beta_{4.1} = 1$ . Dans  $\rho_{4.2}$ ,  $T_{c\,sup}$  est la température de consigne de soufflage,  $T_{sup}$  la température de soufflage,  $T_{\infty 4.2} = 1$  et  $\beta_{4.2} = 1$ .

**Règle  $\rho_5$  : rupture de la courroie du ventilateur d'extraction.** La rupture de la courroie du ventilateur d'extraction se met en évidence avec les deux sous-règles suivantes. La première sous-règle vérifie que le débit a chuté sous une valeur limite. La seconde concerne la puissance consommée par le ventilateur en question. Si le débit est nul ou quasi nul mais que le ventilateur continue d'utiliser une puissance, alors le défaut est détecté.

$$\rho_{5.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{5.1} - Q_{v,exh} - (-Q_{\infty 5.1})}{\beta_{5.1}} > 0. \wedge \rho_{5.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{v,exh} - P_{5.2} - P_{\infty 5.2}}{\beta_{5.2}} > 0. \quad (4.5)$$

avec  $Q_{5.1} = 0$ ,  $Q_{\infty 5.1} = 0.05$  et  $\beta_{5.1} = 0.01$ . Dans la seconde sous règle,  $P_{5.2} = 0$ ,  $P_{\infty 5.2} = 30$  et  $\beta_{5.2} = 1$ .

**Règle  $\rho_6$  : Problème de stabilité du PID de la batterie antigel.** Ce défaut est détecté via l'utilisation de quatre règles. La première vérifie un besoin de préchauffage avec la température extérieure. La seconde que la batterie soit bien en fonctionnement avec la puissance absorbée. La troisième que le ventilateur soit bien en fonctionnement. La dernière règle sert à détecter l'instabilité de la température préchauffée. Pour cela  $T_{pre}$  subit avant d'être utilisée dans la règle un certain nombre de filtres. D'abord la dérivée temporelle de la température sortie de la batterie est calculée par une approximation en différence finie. Les variations dues au changement de consigne et le bruit dû aux variations climatiques sont ensuite retirées. Les valeurs absolues sont gardées et transformées en valeur booléennes, 0 pour une dérivée nulle et 1 pour une dérivée non nulle. Les valeurs sont lissées par une moyenne glissante sur quatre pas de temps (équivalent à une heure). Les valeurs considérées comme présentant un défaut sont celles où une instabilité de la température de soufflage est maintenue durant une heure. Cette valeur sera notée  $\partial T_{pre}$ .

$$\begin{aligned} \rho_{6.1} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{6.1} - T_{out} - (-T_{\infty 6.1})}{\beta_{6.1}} > 0. \wedge \\ \rho_{6.2} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{bfro} - P_{6.2} - P_{\infty 6.2}}{\beta_{6.2}} > 0. \wedge \\ \rho_{6.3} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{vsup} - P_{6.3} - P_{\infty 6.3}}{\beta_{6.3}} > 0. \wedge \\ \rho_{6.4} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{\partial T_{pre} - T_{6.4} - T_{\infty 6.4}}{\beta_{6.4}} > 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

avec  $T_{6.1} = 0$ ,  $T_{\infty 6.1} = 5$  et  $\beta_{6.1} = 1$ . Dans la deuxième sous règle,  $P_{6.2} = 0$ ,  $P_{\infty 6.2} = 2.5$  et  $\beta_{6.2} = 1$ . Pour  $\rho_{6.3}$ ,  $P_{6.3} = 0$ ,  $P_{\infty 6.3} = 10$  et  $\beta_{6.3} = 1$ . Concernant la sous règle  $\rho_{6.4}$ ,  $T_{6.4} = 0$ ,  $T_{\infty 6.4} = 0$  et  $\beta_{6.4} = 0.1$ .

**Règle  $\rho_7$  : Problème de stabilité du PID de la batterie d'appoint.** Le défaut de l'instabilité de la batterie d'appoint est également détecté via l'utilisation de quatre règles. La première règle sert à vérifier si la température de soufflage respecte bien la consigne. La seconde que la batterie d'appoint est bien en fonctionnement. La troisième que le ventilateur fonctionne correctement. La dernière l'instabilité avec le même traitement que la sous-règle  $\rho_{6.4}$ . La valeur utilisée est appelée  $\partial T_{sup}$ .

$$\begin{aligned}
 \rho_{7.1} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{C_{sup}} - T_{sup} - 0}{1} > 0. \wedge \\
 \rho_{7.2} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{bhc} - P_{7.2} - P_{\infty 7.2}}{\beta_{7.2}} > 0. \wedge \\
 \rho_{7.3} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{v_{sup}} - P_{7.3} - P_{\infty 7.3}}{\beta_{7.3}} > 0. \wedge \\
 \rho_{7.4} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{\partial T_{sup} / - T_{7.4} - T_{\infty 7.4}}{\beta_{7.4}} > 0.
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

avec  $T_{\infty 7.1} = 0$  et  $\beta_{7.1} = 1$ . Pour la seconde sous règle,  $P_{7.2} = 0$ ,  $P_{\infty 7.2} = 2.5$  et  $\beta_{7.2} = 1$ . Dans  $\rho_{7.3}$ ,  $P_{7.3} = 0$ ,  $P_{\infty 7.3} = 10$  et  $\beta_{7.3} = 1$ . Concernant la sous règle  $\rho_{7.4}$ ,  $T_{7.4} = 0$ ,  $T_{\infty 7.4} = 0$  et  $\beta_{7.4} = 0.1$ .

**Règle  $\rho_8$  : Encrassement du filtre.** Le dernier défaut hivernal concerne l'encrassement du filtre. Ce dernier est détecté à l'aide de deux sous-règles. La première vérifie si le débit nominal est bien fourni. La seconde vérifie la puissance du ventilateur de soufflage.

$$\rho_{8.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{8.1} - Q_{v, sup} - (-Q_{\infty 8.1})}{\beta_{8.1}} > 0. \wedge \rho_{8.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_v - P_{8.2} - P_{\infty 8.2}}{\beta_{8.2}} > 0. \tag{4.8}$$

avec pour  $\rho_{8.1}$ ,  $Q_{8.1} = 0$ ,  $Q_{\infty 8.1} = 0.1036$  et  $\beta_{8.1} = 0.015$ . Dans  $\rho_{8.2}$ ,  $P_{8.2} = 0$ ,  $P_{\infty 8.2} = 40$  et  $\beta_{8.2} = 2.5$ .

#### 4.3.1.2 Pré-traitement de la saison d'été

Dans cette section sont définies les règles mettant en évidence les défauts estivaux. Pour identifier les règles, la même indexation que pour les règles hivernales est utilisée. Huit défauts sont également définis pour la saison d'été, ils sont présentés dans le Tableau 4.2.

**Règle  $\rho_1$  : panne du ventilateur de soufflage.** De la même façon que pour la saison hivernale, la panne du ventilateur est mis en évidence par deux sous-règles. La première sous-règle est utilisée pour détecter la chute de débit dans la gaine de soufflage. La seconde sert à détecter le manque de consommation du ventilateur servant à l'insufflation. Ces deux sous-règles sont identiques à celles utilisées dans le cas de fonctionnement d'hiver.

$$\rho_{1.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{1.1} - Q_{v, sup} - (-Q_{\infty 1.1})}{\beta_{1.1}} > 0. \wedge \rho_{1.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{1.2} - P_{v, sup} - (-P_{\infty 1.2})}{\beta_{1.2}} > 0. \tag{4.9}$$

avec  $Q_{1.1} = 0$ ,  $Q_{\infty 1.1} = 0.05$  et  $\beta_{1.1} = 0.01$ . Pour  $\rho_{1.2}$ ,  $P_{1.2} = 0$ ,  $P_{\infty 1.2} = 2$  et  $\beta_{1.2} = 0.1$ .

**Règle  $\rho_2$  : panne du ventilateur d'extraction.** Deux règles identiques à celles employées dans le précédent cas sont utilisées. L'unique différence réside dans le fait qu'elles s'intéressent aux valeurs de débit et de puissance de la conduite d'extraction.

$$\rho_{2.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{2.1} - Q_{v, exh} - (-Q_{\infty 2.1})}{\beta_{2.1}} > 0. \wedge \rho_{2.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{2.2} - P_{v, exh} - (-P_{\infty 2.2})}{\beta_{2.2}} > 0. \tag{4.10}$$

avec  $Q_{2.1} = 0$ ,  $Q_{\infty 2.1} = 0.05$  et  $\beta_{2.1} = 0.01$ . Dans la sous règle  $\rho_{2.2}$ ,  $P_{2.2} = 0$ ,  $P_{\infty 2.2} = 2$  et  $\beta_{2.2} = 0.1$ .

Tableau 4.2 – Défauts d'été et leurs règles.

Défauts	Règles	Sous-règles	$U_{lim}$	$\beta$
Panne ventilateur soufflage	$\rho_1$	$\rho_{1.1}$	-0.05	0.01
		$\rho_{1.2}$	-2	0.1
Panne ventilateur extraction	$\rho_2$	$\rho_{2.1}$	-0.05	0.01
		$\rho_{2.2}$	-2	0.1
Rupture courroie soufflage	$\rho_3$	$\rho_{3.1}$	-0.05	0.01
		$\rho_{3.2}$	30	1
Rupture courroie extraction	$\rho_4$	$\rho_{4.1}$	-0.05	0.01
		$\rho_{4.2}$	30	1
Défaut de régulation du bypass n°1	$\rho_5$	$\rho_{5.1}$	-2	1
		$\rho_{5.2}$	-1	0.1
		$\rho_{5.3}$	0	0.1
		$\rho_{5.4}$	10	0.1
Défaut de régulation du bypass n°2	$\rho_6$	$\rho_{6.1}$	0	0.1
		$\rho_{6.2}$	-0.114	0.001
		$\rho_{6.3}$	2.5	1
Défaut de régulation du bypass n°3	$\rho_7$	$\rho_{7.1}$	-2	1
		$\rho_{7.2}$	-1	0.3
		$\rho_{7.3}$	0	0.1
		$\rho_{7.4}$	10	0.1
Encrassement	$\rho_8$	$\rho_{8.1}$	-0.1036	0.015
		$\rho_{8.2}$	40	2.5

**Règle  $\rho_3$  : rupture de courroie du ventilateur de soufflage.** Afin de détecter une rupture de courroie du ventilateur de soufflage deux sous règles sont mises en place. Elles portent également sur les valeurs de débit et de puissance absorbée par le ventilateur. La première règle identifie que le débit de soufflage soit inférieur à une valeur seuil. La seconde détermine s'il existe encore une consommation de la part du moteur du ventilateur.

$$\rho_{3.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{3.1} - Q_{v,sup} - (-Q_{\infty 3.1})}{\beta_{3.1}} > 0. \wedge \rho_{3.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{v,sup} - P_{3.2} - P_{\infty 3.2}}{\beta_{3.2}} > 0. \quad (4.11)$$

où  $Q_{3.1} = 0$ ,  $Q_{\infty 3.1} = 0.05$  et  $\beta_{3.1} = 0.01$ . Dans la sous règle  $\rho_{3.2}$ ,  $P_{3.2} = 0$ ,  $P_{\infty 3.2} = 30$  et  $\beta_{3.2} = 1$ .

**Règle  $\rho_4$  : rupture de courroie du ventilateur d'extraction.** La détection de la rupture de courroie du ventilateur d'extraction est faite par les mêmes règles que celles de soufflage, mais appliquées à la conduite d'air vicié.

$$\rho_{4.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{4.1} - Q_{v,exh} - (-Q_{\infty 4.1})}{\beta_{4.1}} > 0. \wedge \rho_{4.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{v,exh} - P_{4.2} - P_{\infty 4.2}}{\beta_{3.2}} > 0. \quad (4.12)$$

avec pour la première sous règle  $Q_{4.1} = 0$ ,  $Q_{\infty 4.1} = 0.05$  et  $\beta_{4.1} = 0.01$ . Puis pour la seconde  $P_{4.2} = 0$ ,  $P_{\infty 4.2} = 30$  et  $\beta_{4.2} = 1$ .

**Règle  $\rho_5$  : Problème de régulation du bypass n°1 - Non enclenchement du bypass et non augmentation du débit.** Le premier problème de régulation du bypass est mis en évidence par quatre sous règles. La première sous règle est utilisée pour détecter les situations favorables au *free cooling*. Les valeurs de température utilisées ont subi un traitement avant leur insertion dans cette sous règle. Une moyenne glissante sur trois valeurs a été effectuée pour lisser les données. Les valeurs de température extérieure et intérieure sont alors appelées respectivement  $\bar{T}_{out}$  et  $\bar{T}_{ret}$ . La seconde sous règle concerne l'état dans lequel se trouve le bypass. La troisième sous règle vérifie que les ventilateurs fournissent bien le petit débit. Pour cela un traitement est effectué sur les valeurs. Le débit est traité par une moyenne mobile sur trois valeurs. Puis il est vérifié que cette valeur vaut la valeur nominale plus ou moins 10%. Ce résultat est exprimé par une valeur booléenne et sera appelé  $\bar{Q}_{PV}$ . La dernière sous règle concerne la vérification que la température extérieure moyennée se trouve au dessus de 10°C.

$$\begin{aligned}
 \rho_{5.1} & \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\bar{T}_{ret} - \bar{T}_{ext} - (-T_{\infty 5.1})}{\beta_{5.1}} > 0. \wedge \\
 \rho_{5.2} & \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Byp_{5.2} - Byp - (-Byp_{\infty 5.2})}{\beta_{5.2}} > 0. \wedge \\
 \rho_{5.3} & \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Q_{5.3} - \bar{Q}_{PV} - Q_{\infty 5.3}}{\beta_{5.3}} > 0. \wedge \\
 \rho_{5.4} & \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\bar{T}_{ret} - T_{5.4} - T_{\infty 5.4}}{\beta_{5.4}} > 0.
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

où  $T_{\infty 5.1} = 2$  et  $\beta_{5.1} = 1$ . Dans la seconde sous règle,  $Byp_{5.2} = 0$ ,  $Byp$  est l'état du bypass,  $Byp_{\infty 5.2} = 1$  et  $\beta_{5.2} = 0.1$ . Pour  $\rho_{5.3}$ ,  $Q_{5.3} = 0$ ,  $Q_{\infty 5.3} = 0$  et  $\beta_{5.3} = 0.1$ . dans la sous règle  $\rho_{5.4}$ ,  $T_{5.4} = 0$ ,  $T_{\infty 5.4} = 10$  et  $\beta_{5.4} = 0.1$ .

**Règle  $\rho_6$  : Problème de régulation du bypass n°2 - Enclenchement du bypass et non augmentation du débit.** Le second problème d'enclenchement du bypass est détecté grâce à trois sous règles. La première sous règle concerne l'état du bypass. La seconde vérifie la valeur du débit. La dernière confirme que le ventilateur fonctionne correctement.

$$\begin{aligned}
 \rho_{6.1} & \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Byp - Byp_{6.1} - Byp_{\infty 6.1}}{\beta_{6.1}} > 0. \wedge \\
 \rho_{6.2} & \stackrel{\text{def}}{=} \frac{Q_{6.2} - Q_{v,sup} - (-Q_{\infty 6.2})}{\beta_{6.2}} > 0. \wedge \\
 \rho_{6.3} & \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P_{v,sup} - P_{6.3} - P_{\infty 6.3}}{\beta_{6.3}} > 0.
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

où  $Byp_{6.1} = 0$ ,  $Byp_{\infty 6.1} = 0$  et  $\beta_{6.1} = 0.1$  Pour la deuxième sous règle  $\rho_{6.2}$ ,  $Q_{6.2} = 0$ ,  $Q_{\infty 6.2} = 0.114$  et  $\beta_{6.2} = 0.001$ . Dans  $\rho_{6.3}$ ,  $P_{6.3} = 0$ ,  $P_{\infty 6.3} = 2.5$  et  $\beta_{6.3} = 1$ .

**Règle  $\rho_7$  : Problème de régulation du bypass n°3 - Non enclenchement du bypass et augmentation du débit.** Le troisième problème de régulation du bypass est mis en évidence par quatre sous règles. La première concerne la présence de potentiel pour le *free cooling*. La seconde s'attache à l'état du bypass. La troisième sous règle vérifie le débit fourni. La dernière s'assure de la puissance fournie au ventilateur.

$$\begin{aligned}
\rho_{7.1} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{\bar{T}_{ret} - \bar{T}_{ext} - (-T_{7.1})}{\beta_{7.1}} > 0. \wedge \\
\rho_{7.2} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Byp_{7.2} - Byp - (-Byp_{\infty 7.2})}{\beta_{7.2}} > 0. \wedge \\
\rho_{7.3} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{7.3} - \bar{Q}_{PV} - Q_{\infty 7.3}}{\beta_{7.3}} > 0. \wedge \\
\rho_{7.4} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{\bar{T}_{ret} - T_{7.4} - T_{\infty 7.4}}{\beta_{7.4}} > 0.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

avec  $T_{\infty 7.1} = 2$  et  $\beta_{7.1} = 1$ . Pour la seconde sous règle,  $Byp_{7.2} = 0$ ,  $B_{\infty 7.2} = 1$  et  $\beta_{7.2} = 0.3$ . Dans  $\rho_{7.3}$ ,  $Q_{7.3} = 0$ ,  $Q_{\infty 7.3} = 0$  et  $\beta_{7.3} = 0.1$ . Concernant la sous règle  $\rho_{7.4}$ ,  $T_{7.4} = 0$ ,  $T_{\infty 7.4} = 10$  et  $\beta_{7.4} = 0.1$ .

**Règle  $\rho_8$  : Encrassement du filtre.** Le dernier défaut d'été concerne l'encrassement du filtre. Il est mis en évidence par les mêmes sous règles que pour l'encrassement des filtres en hiver. La première vérifie si le débit nominal est bien fourni. La seconde vérifie la puissance du ventilateur de soufflage.

$$\rho_{8.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{Q_{8.1} - Q_{v,sup} - (-Q_{\infty 8.1})}{\beta_{8.1}} > 0. \wedge \rho_{8.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_v - P_{8.2} - P_{\infty 8.2}}{\beta_{8.2}} > 0. \tag{4.16}$$

avec pour  $\rho_{8.1}$ ,  $Q_{8.1} = 0$ ,  $Q_{\infty 8.1} = 0.1036$  et  $\beta_{8.1} = 0.015$ . Dans  $\rho_{8.2}$ ,  $P_{8.2} = 0$ ,  $P_{\infty 8.2} = 40$  et  $\beta_{8.2} = 2.5$ .

Toutes les règles servant à mettre en évidence les défauts sont maintenant établies. Désormais les résultats des simulations peuvent être traités par l'ensemble de ces règles. Ensuite les résultats de ces règles seront transformés via la fonction sigmoïde afin de fournir les valeurs des indices de sévérité (SI). Ces indices de sévérité seront regroupés dans les matrices  $\Gamma$  qui contiendront l'ensemble des valeurs de SI pour chaque saison. Ces matrices d'indice de sévérité constituent les données d'entrée de la méthode de réduction de dimension. Ainsi, les cartes pour les saisons d'hiver et d'été seront générées grâce au traitement des matrices  $\Gamma$  d'hiver et d'été par la méthode de réduction ASKI.

### 4.3.2 Génération des cartes

Dans cette section les cartes saisonnières générées via la méthode de réduction de dimension vont être analysées en détail. Les différents traitements appliqués jusqu'à l'élaboration des cartes finales seront également développés. Ainsi l'efficacité pour la détection et le diagnostic de défaut sera mis en évidence.

#### 4.3.2.1 Les cartes hivernales

La carte générée initialement par la réduction de dimension est présentée dans la Figure 4.6. Initialement les cartes représentent l'ensemble des points sélectionnés sur l'espace de dimension réduite. Ces points correspondent donc à un état de fonctionnement du système différent au regard des règles expertes. Sur cette carte il est possible d'identifier plusieurs clusters générés par l'outil. Notamment un cluster plus imposant que les autres au centre, qui est entouré d'une dizaine de clusters de taille inférieure.

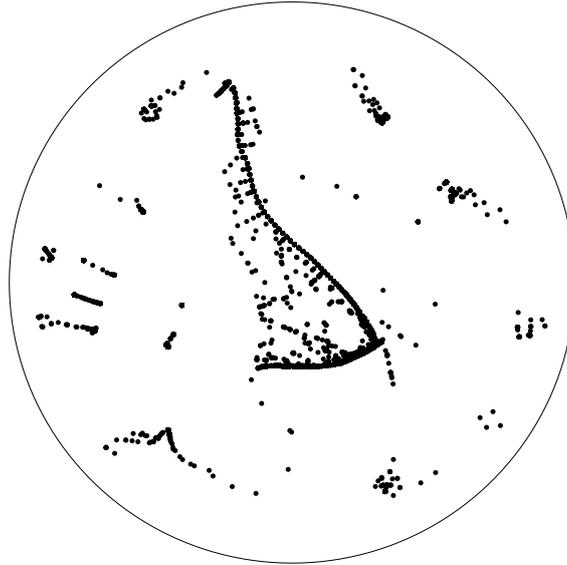


Figure 4.6 – Carte initiale d’hiver obtenue par la méthode de réduction de dimension.

Néanmoins, cette carte n’est pas utilisable comme outil de FDD en l’état. Il n’est pas possible d’identifier les localisations des clusters présentant le fonctionnement nominal ou les défauts. Un premier traitement est alors effectué afin de déterminer où sont situés les défauts sur la carte. La nouvelle carte obtenue est présentée en Figure 4.7. Cette dernière a subi un traitement afin de mettre en évidence les défauts sur l’espace de dimension réduite. Il a été choisi de représenter les  $\lambda$  pour mettre en évidence les zones de défaut.

$\lambda$  comme évoqué en Chapitre 3 est obtenu en sommant les valeurs positives des indices de sévérité de chaque dimension.

$$\lambda_n \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{k=1}^{N_R} \sigma_{nl}^+ , \quad (4.17)$$

où  $n \in \{1, \dots, N_t\}$ ,  $N_t$  est le nombre de pas de temps total,  $N_R$  est le nombre total de règles et  $\sigma_{nl}^+$  la partie positive des indices de sévérité des différents défauts.

Ainsi, cette représentation permet de savoir où se trouvent les zones ayant des défauts avérés ( $SI > 0$ ). Avec cet indice il est également aisé de voir si des défauts couplés apparaissent. Cela se produit de façon certaine lorsque  $\lambda > 1$ . En revanche, certaines situations de défaut couplé ne peuvent pas être mises en évidence simplement avec cette représentation. C’est le cas pour des défauts avérés dont la somme des  $\lambda$  serait inférieure à un.

Grâce à ce premier traitement il est mis en évidence que la zone de fonctionnement nominal se situe au centre du graphique. Les clusters des défauts sont disséminés autour de cette zone de fonctionnement nominal. Il est également constaté que les valeurs de sévérité des défauts ont tendance à augmenter avec le rayon du centre de la représentation. En pratique cela signifie qu’un fonctionnement de système se déplaçant du centre vers la périphérie indique qu’il commence à dériver d’un comportement nominal à défaillant. Ainsi, cette carte permet la détection d’un défaut et sa mise en évidence. On constate en plus que les fonctionnements défaillants se trouvent autour du fonctionnement nominal, qu’il y a des clusters de défauts couplés. Sur la gauche de la carte, se situe une zone regroupant les défauts couplés. Grâce à l’analyse des couleurs on constate qu’il y a un cluster regroupant au moins deux défauts avérés (en vert) deux autres regroupant au moins trois défauts (en orange) et un dernier ayant une valeur de lambda supérieure à 3.

En l’état cette carte est un outil de détection de défauts. En revanche, l’outil n’effectue aucun diagnostic du défaut. La situation de défaut est bien mise en évidence mais aucune information

concernant les défauts n'est divulguée. Pour cela d'autres traitements sont encore nécessaires.

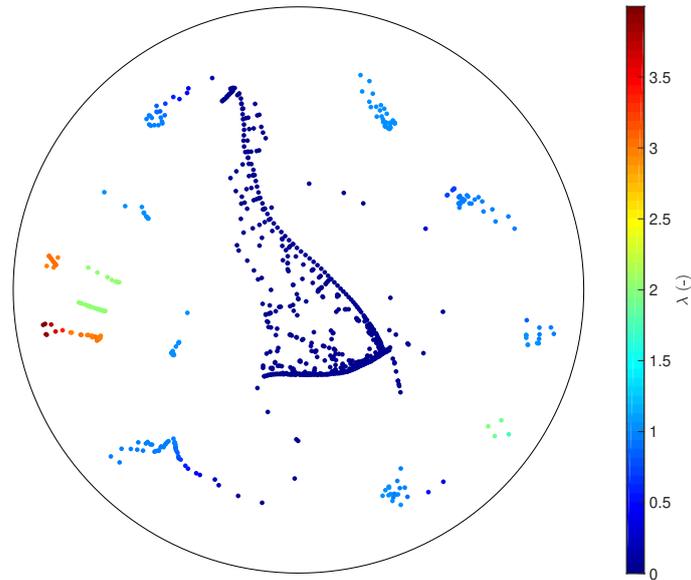


Figure 4.7 – Carte d'intensité des défauts d'hiver.

La Carte en Figure 4.8 présente l'espace de dimension réduite sur lequel les différents défauts ont été identifiés. Sur cette carte, les *défauts uniques* ont été indiqués. Chaque couleur représente l'un de ces *défauts uniques*. Cela signifie que le point de couleur possède une valeur d'indice de sévérité supérieure à zéro pour le défaut correspondant. Il possède également un indice de sévérité inférieur à zéro pour tous les autres défauts. Cela induit que seuls sont représentés les défauts ayant un indicateur de sévérité positif dans une seule dimension. Tous les points représentés en couleur possèdent donc une valeur de  $\lambda$  comprise entre  $[0; 1]$ . Avec cette carte il est possible d'effectuer la détection et le diagnostic d'un défaut. En revanche, l'analyse de cette carte et de celle présentée dans la Figure 4.7 permet de constater que tous les points défaillants ne sont pas diagnostiqués. En effet, les points possédant des valeurs de  $\lambda$  supérieures à 1 mis en évidence par la carte des *Lambda* ne sont ni détectés ni diagnostiqués. En somme, seuls les défauts non couplés sont représentés sur cette carte. Les défauts couplés restent donc noirs.

C'est à ce niveau qu'est utile la troisième représentation de la carte présentée dans la Figure 4.9. Cette carte est appelée *carte des défauts globaux* car elle ne représente plus seulement les points de l'espace ayant un  $0 < \lambda < 1$  mais tous. Cela signifie que les défauts couplés vont apparaître sur cette carte. Afin de permettre la mise en évidence des défauts couplés une nouvelle représentation est introduite.

Les défauts couplés sont de plusieurs couleurs. La couleur de fond du marker représente le défaut principal, c'est-à-dire celui dont l'indice de sévérité est le plus élevé. Lorsque le point représente un fonctionnement présentant un défaut couplé, il possède alors en plus un contour de la couleur du défaut avec lequel il est couplé. Cette représentation a été étendue jusqu'au couplage de trois défauts. Le contour le plus éloigné du centre représente le défaut ayant l'indice de sévérité positif le plus faible. Grâce à cette représentation on constate que les points étant restés noirs dans la Figure 4.14 mais présentant un  $\lambda$  supérieur à zéro d'après la Figure 4.7 ont bien été identifiés. On constate également que les zones de couplage se trouvent orientées vers les zones des défauts avec lesquelles elles sont couplées. Par exemple dans l'espace regroupant plusieurs défauts couplés à gauche de l'espace de représentation, on constate que l'algorithme de réduction de dimension a regroupé les défauts pouvant être couplés ensemble dans la région gauche du nuage de points. On constate également que les défauts couplés entre le défaut 1 et le défaut 2 se

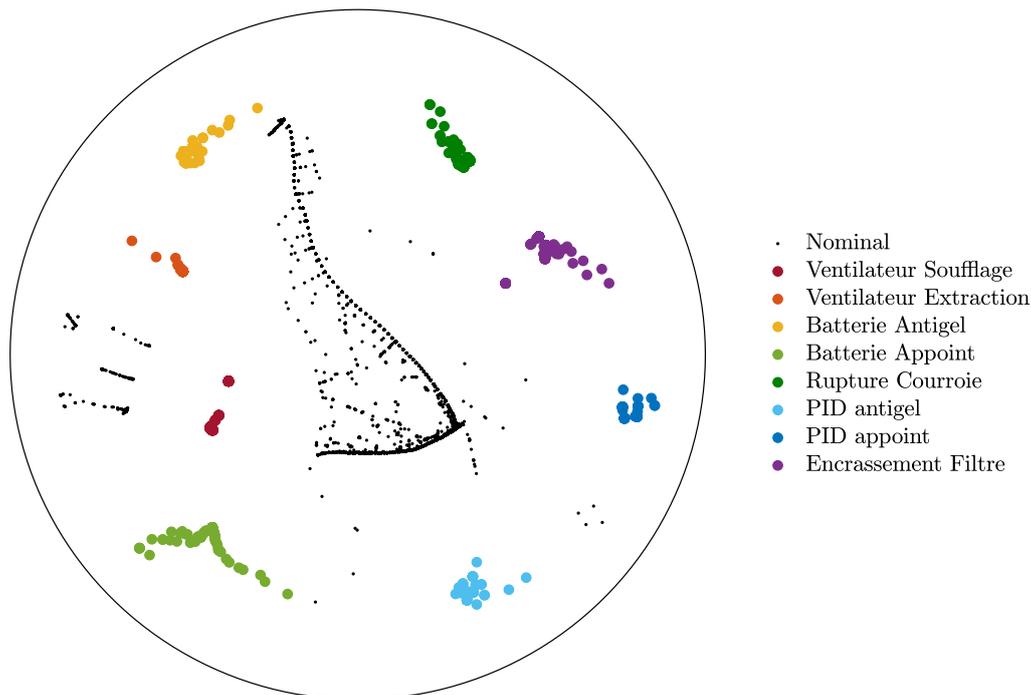


Figure 4.8 – Carte des défauts uniques d'hiver.

situent bien entre les zones de ces défauts. La carte permet donc via cette représentation de mettre en évidence les défauts couplés.

Un second constat intéressant en terme de détection de défauts peut être fait. En plus de permettre la mise en évidence de défauts couplés, l'outil de détection effectue cette tâche sans qu'il n'y ait besoin de spécifier de règles spécifiques. Grâce à cette méthode de détection par indice de sévérité en fonction des différents espaces d'origine, l'algorithme n'a pas besoin de se voir spécifier de règles supplémentaires pour la détection de défauts multiples. Lorsque des indices importants dans les différents espaces sont présents, la méthode attribue une place spécifique à ces conditions de fonctionnement *multi-défaillant* dans l'espace réduit.

#### 4.3.2.2 Les cartes estivales

Les mêmes types de cartes ont été générés pour le fonctionnement du système en condition d'été. Ces cartes ont été créées à partir de la modélisation du bâtiment en fonctionnement d'été. La première carte générée par la méthode de réduction de dimension est présentée dans la Figure 4.10. Encore une fois, cette dernière ne permet pas d'effectuer la moindre détection de défaut. Elle est la représentation des résultats dans les huit dimensions de l'espace d'origine en deux dimensions. Mais comme pour la précédente carte initiale, il est déjà possible d'observer que la méthode a réussi à effectuer un certain nombre de regroupements de points. Plusieurs de ces clusters sont aisément identifiables. Mais en l'état il n'est pas possible de savoir à quoi ils correspondent.

La Figure 4.11 donne la valeur du  $\lambda$  pour chaque point de l'espace de dimension réduite. Des constats similaires à ceux établis pour la saison hivernale peuvent être dressés. Il est clair que le fonctionnement nominal du système est au centre du nuage de points. Les fonctionnements défectueux se situent autour de cette zone nominale. Il peut être identifié des points ayant des valeurs de lambda croissantes liant la zone de fonctionnement nominal aux clusters des défauts. Un cluster regroupant des points ayant une valeur de lambda égale à deux est identifié en bas à

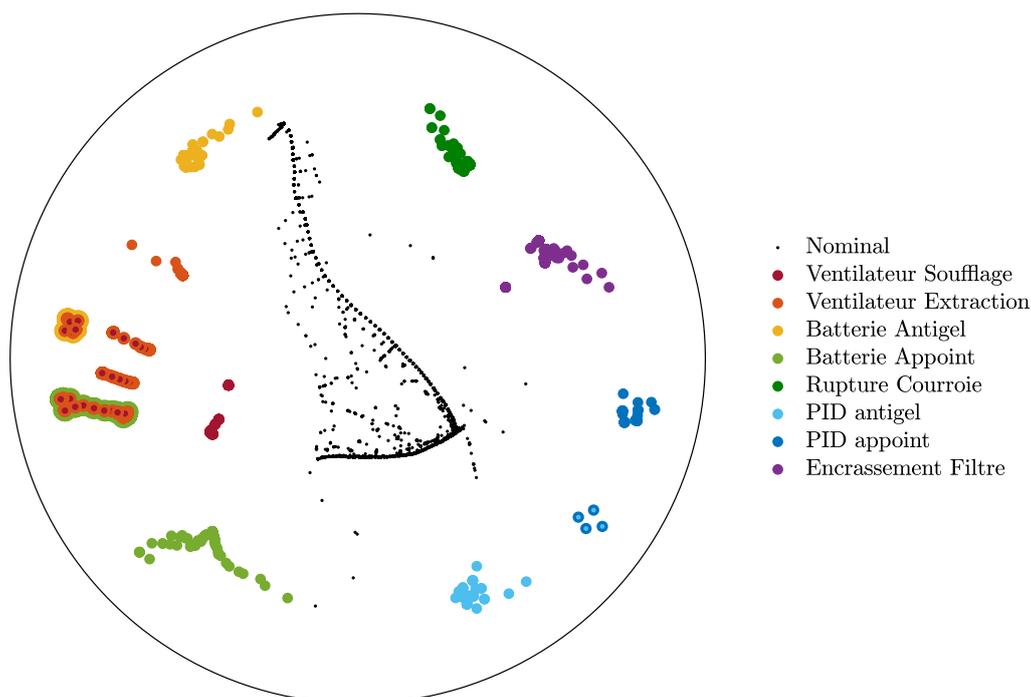


Figure 4.9 – Carte des défauts Globaux d'hiver.

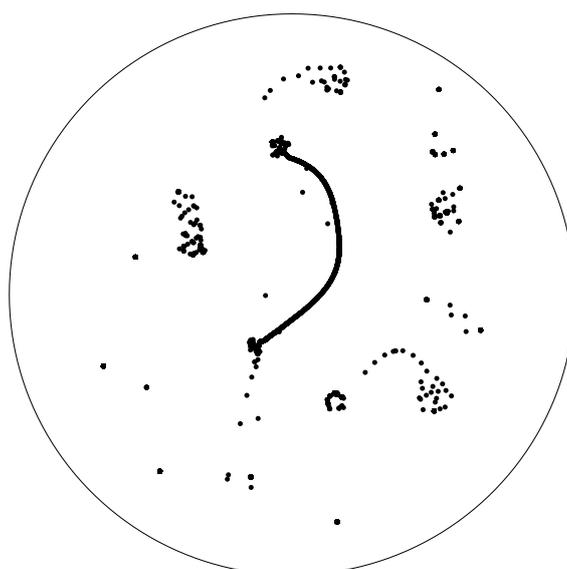


Figure 4.10 – Carte initiale d'été obtenue par la méthode de réduction de dimension.

gauche de l'espace de représentation. Ce cluster correspond à un groupe de défaut couplés.

La carte des défauts uniques de la saison d'été est présentée en Figure 4.15. Cette carte permet d'identifier les positions des huit différents défauts en représentant uniquement les points ayant un seul défaut avéré. Les clusters des différents défauts sont clairement séparés et identifiables. Cette carte permet la détection et le diagnostic de tous les défauts uniques rencontrés durant la simulation d'été.

La carte des défauts globaux est présentée en Figure 4.13. Cette carte permet de représenter les défauts couplés à l'aide de cercles concentriques. Plus la couleur est éloignée du centre du

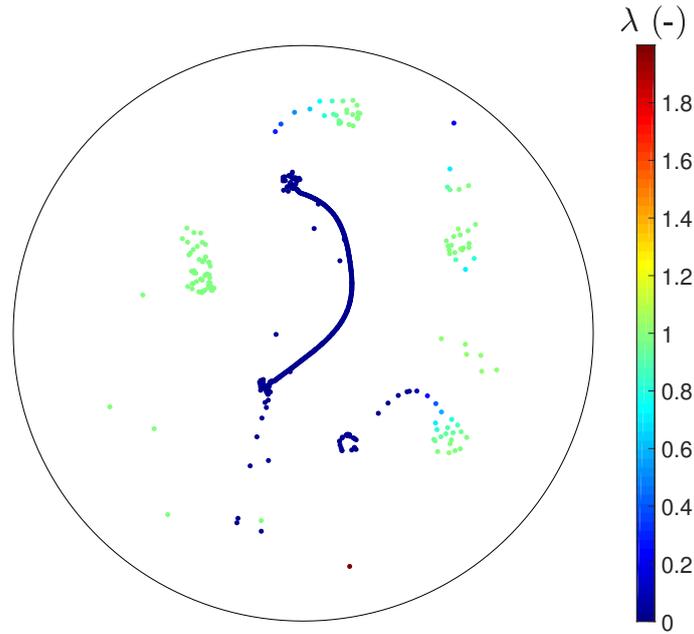


Figure 4.11 – Carte d'intensité des défauts d'été.

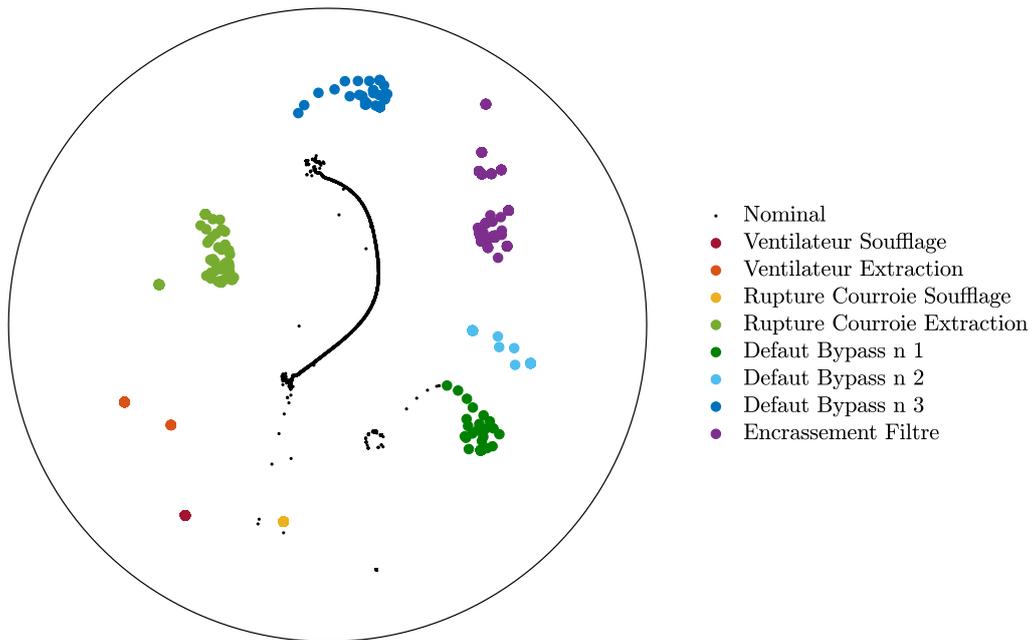


Figure 4.12 – Carte des défauts uniques d'été.

cercle, moins l'indice de sévérité du défaut est important. Cette carte permet la représentation des défauts couplés qui se situent dans le bas à droite du nuage de points. Comme l'emplacement du cluster le laissait penser, ce défaut est un défaut combiné des pannes des deux ventilateurs. Dans cette modélisation ces défauts étaient les seuls défauts simultanés. Il n'y a également pas de défaut multiple de plus de deux défauts comme le confirme le résultat des  $\lambda$  présenté dans la Figure 4.11. Ce dernier était compris entre  $[0; 2]$ .

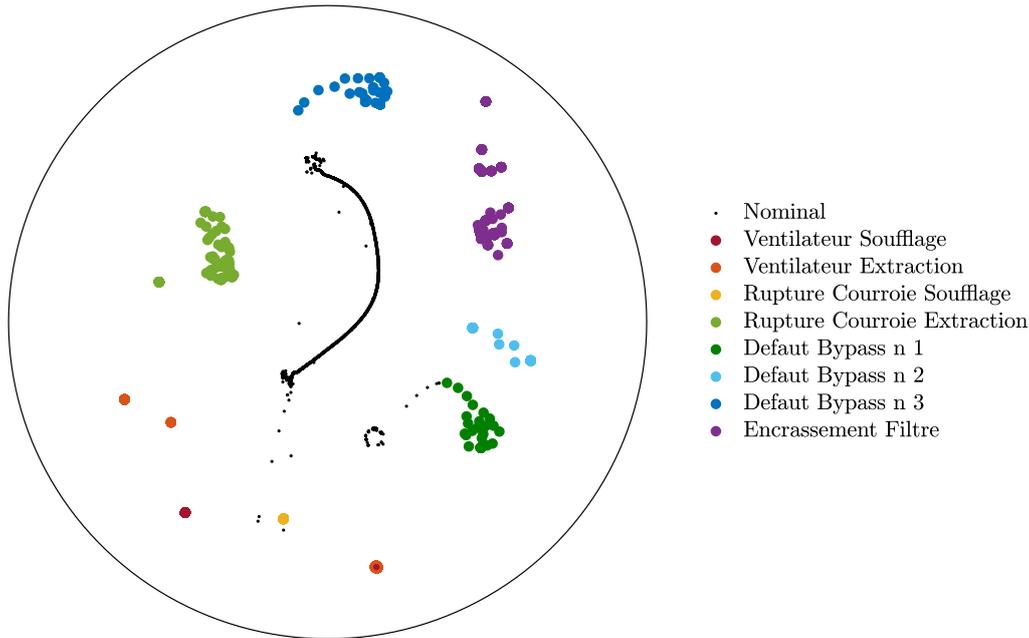


Figure 4.13 – Carte des défauts Globaux d'été.

### 4.3.3 Finalisation des cartes pour une utilisation par les équipes techniques

#### 4.3.3.1 La carte pour la saison d'hiver

La carte obtenue après l'exécution de la méthode de réduction de dimension et l'intégralité des traitements est présentée dans la Figure 4.14. Cette carte correspond à la représentation en deux dimensions des différents fonctionnements du système de CTA modélisé lors de la simulation. Chaque point correspond donc comme expliqué précédemment à la représentation de l'état de fonctionnement du système à un instant précis. Chaque point dépend donc de l'ensemble des mesures effectuées et plus spécifiquement de leur traitement au travers des règles expertes.

Les différents défauts sélectionnés sont représentés avec des points plus larges de couleur. Chaque point possédant une seule couleur représente un *défaut unique*. Cela signifie que le point de couleur possède une valeur d'indice de sévérité supérieure à zéro du défaut correspondant. Cette représentation permet la visualisation rapide et claire des points d'apprentissages qui possédaient des défauts. Tous les points noirs correspondent aux points n'étant pas des défauts uniques. Ils regroupent donc les points représentant le fonctionnement nominal du système. Le fonctionnement nominal étant vierge de tout défaut, cela concerne tous les points ayant des résultats négatifs à toutes les règles (et donc aux indices de sévérité). Les points possédant plusieurs couleurs représentent les fonctionnements où se produisent plusieurs défauts. Seuls les trois principaux défauts (et donc couleurs) de ces couplages ont été représentés. L'importance du défaut (au sens de l'indice de sévérité) est exprimée par la proximité de la couleur au centre du point. La couleur la plus au centre correspond donc au défaut du couplage qui a le plus haut *SI*, la seconde couleur en partant du centre est le défaut qui a le second plus important *SI* et ainsi de suite.

On constate que la carte générée par la méthode de réduction a bien clusterisé les défauts. Chaque défaut est isolé sur un espace qui lui est propre sur la carte. Ils sont ainsi facilement identifiables. Les différents clusters de défaut peuvent être distingués par des zones en périphérie du cluster de fonctionnement nominal au centre du nuage de points. La localisation du point de fonctionnement du système donne une bonne information sur la nature du défaut présent. La majorité des points ne comportant pas de *défaut unique* sont bien centrés dans le nuage de points. Cela semble logique car ils représentent globalement les points de fonctionnement nominaux. Ces points de fonctionnement sont proches les uns des autres au niveau des dimensions d'origine et

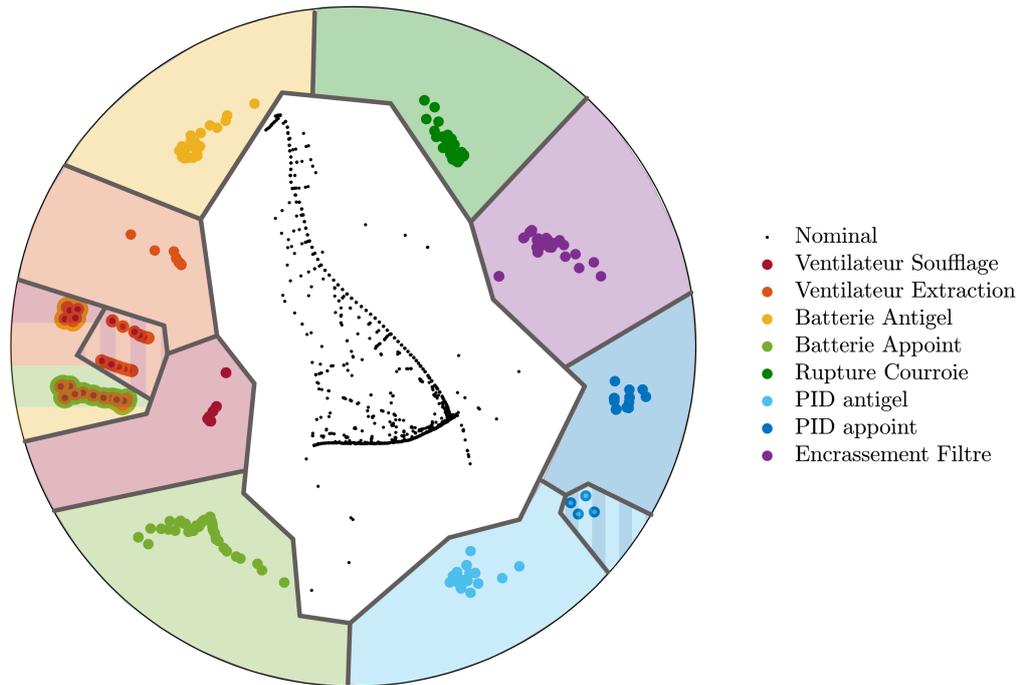


Figure 4.14 – Carte Finale de la saison d’hiver.

ont une frontière commune avec tous les défauts. En effet ces derniers apparaissent toujours à la suite d’un fonctionnement nominal. En conséquence, la méthode les a placés au centre de l’espace de dimension réduite. Ainsi ils sont relativement groupés et donnent accès à l’ensemble des défauts. Il est également important de noter que quelques points se situent aux frontières du nuage de points.

Sur ces cartes il a également été ajouté des sous zones autour des différents défauts. Ces sous zones sont teintées de la couleur du défaut qu’elles englobent. Ce dernier traitement de colorisation des zones de défaut permet la visualisation claire du fonctionnement du système. Cette représentation a été choisie pour simplifier le travail des équipes de maintenance et de pilotage.

#### 4.3.3.2 La carte pour la saison d’été

Le même type de carte est obtenu pour la saison estivale. Elle présente les *défauts uniques* détectés dans le jeu de données d’été traité. Il est constaté que la méthode de FDD a encore permis de bien clusteriser les différents défauts. Une fois de plus et pour les mêmes raisons que celles citées précédemment les fonctionnements nominaux ont été placés au centre du nuage de points par la méthode. Le regroupement des défauts suit bien les critères d’identification présentés pour la carte d’hiver. Les différents défauts peuvent être bien séparés les uns des autres par des sous-zones juxtaposées autour de la zone de fonctionnement nominal. Il est également remarqué des points colorés de plusieurs couleurs correspondant aux fonctionnements avec des défauts couplés. Ces points sont localisés en bas de la carte entre les défauts de rupture de courroie du ventilateur de soufflage et du défaut du bypass n°1. On peut également noter que la localisation du défaut de la panne du ventilateur de soufflage ne présente qu’un point. Cet espace a néanmoins été représenté avec plusieurs points. Ces points sont en fait superposés. Cela se produit lorsque les conditions durant lesquelles la panne s’est produite n’ont pas présenté de grandes variations dans les différentes dimensions. La méthode a alors superposé ces points lors de la réduction jugeant les variations dans l’espace d’origine comme négligeables dans l’espace de représentation.

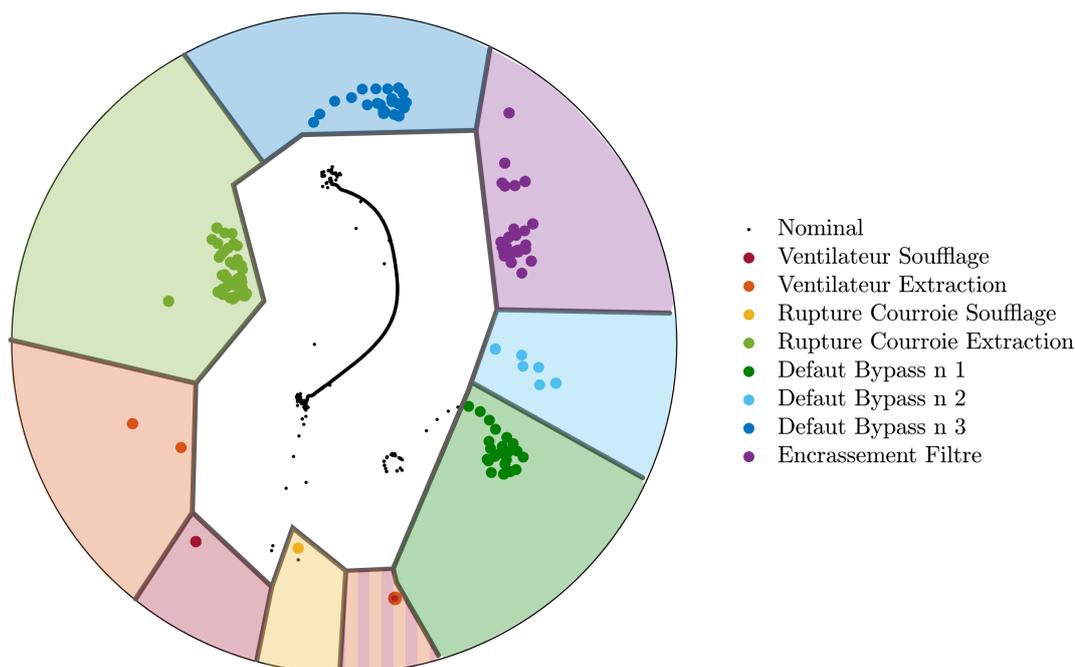


Figure 4.15 – Carte Finale de la saison d'été.

## 4.4 Validation expérimentale par projection des données

Cette section présente une étape de validation de l'outil de détection présentée grâce aux données expérimentales générées dans le Chapitre 2. L'objectif est de déterminer la capacité des cartes établies à partir de modèles numériques, à détecter des défauts sur un système réel. Pour cela, la mise en évidence des défauts issus d'un système existant va être évaluée. Les données expérimentales du système de ventilation présentées au Chapitre 2 sont utilisées à cet effet.

### 4.4.1 Les résultats expérimentaux

Dans cette première section les résultats expérimentaux sont traités conformément à la phase de pré-traitement de l'algorithme de détection de défauts. Les indices de sévérité de ces jeux seront présentés pour quelques défauts sélectionnés pour valider les cartes.

Afin de ne pas surcharger les cartes, il a été choisi de projeter pour chaque défaut un total de 10 mesures. Ces points sont sélectionnés durant la période d'apparition du défaut. Ils correspondent aux mesures à environ 3min, 1min et 0min avant l'apparition du défaut puis 5sec, 15sec, 30sec, 40sec, 1min, 2min et 3min après l'apparition du défaut.

Bien que la méthode de détection ait été réalisée sur tous les points du test, seul l'indice de sévérité de ces points sera présenté. Cela permet de valider les résultats de la méthode ainsi que la validité de la représentation. De plus, dans un souci de compacité, il ne sera présenté que la valeur de l'indice de sévérité du défaut étudié. En effet, l'espace d'origine étant de dimension 8 il y a huit indicateurs de sévérité pour chaque mesure. Les défauts présentés étant des défauts uniques, les valeurs des autres indices sont toujours comprises entre  $[-1; 0]$ . Il n'est donc pas nécessaire de les présenter ici.

#### 4.4.1.1 Les défauts globaux

Les défauts globaux pouvant se produire tout au long de l'année seront utilisés pour valider les cartes. Ces défauts seront projetés sur les deux cartes établies pour détecter les défauts sur

le système étudié. Les défauts globaux sélectionnés sont la panne du ventilateur de soufflage, du ventilateur d'extraction et de la rupture d'une courroie.

**La panne du ventilateur de soufflage.** La Figure 4.16 indique les valeurs sélectionnées pour la projection du défaut permettent d'apprécier l'arrivée de la panne du ventilateur. Sur chacune des Figures, l'indice passe d'une valeur du SI négative, à une valeur de 1. On constate que certains points possèdent une valeur de  $\sigma$  comprise entre  $[-1; 1]$ . Cela signifie qu'une évolution des points pourra être appréciée sur la projection.

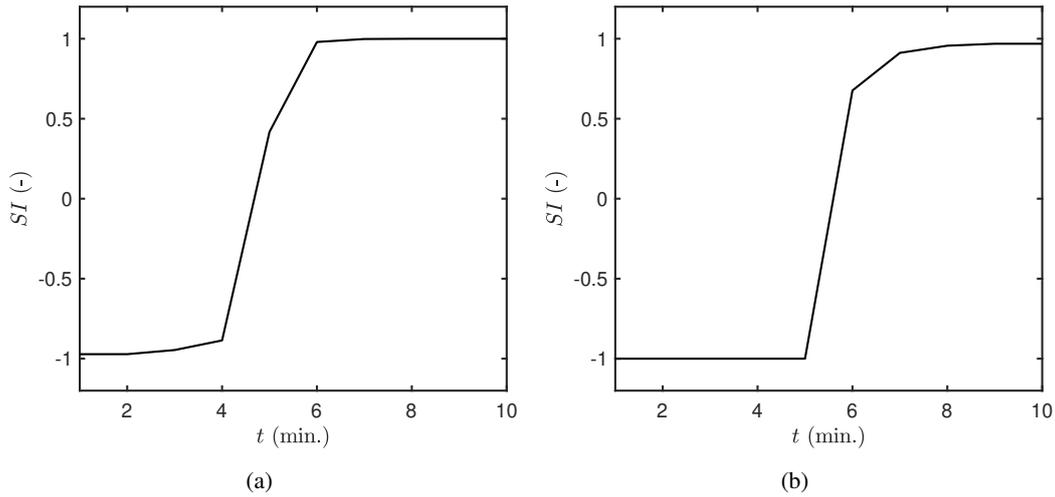


Figure 4.16 – Indice de sévérité de la panne du ventilateur de soufflage pour les données expérimentales en hiver (a) et été (b).

**La panne du ventilateur d'extraction.** Les valeurs des SI concernant les projections des défauts expérimentaux de la panne du ventilateur d'extraction sont présentés dans la Figure 4.17. Les défauts apparaissent bien durant l'échantillon sélectionné. Des valeurs permettent d'observer l'évolution croissante de la sévérité du défaut pour la panne se produisant en hiver.

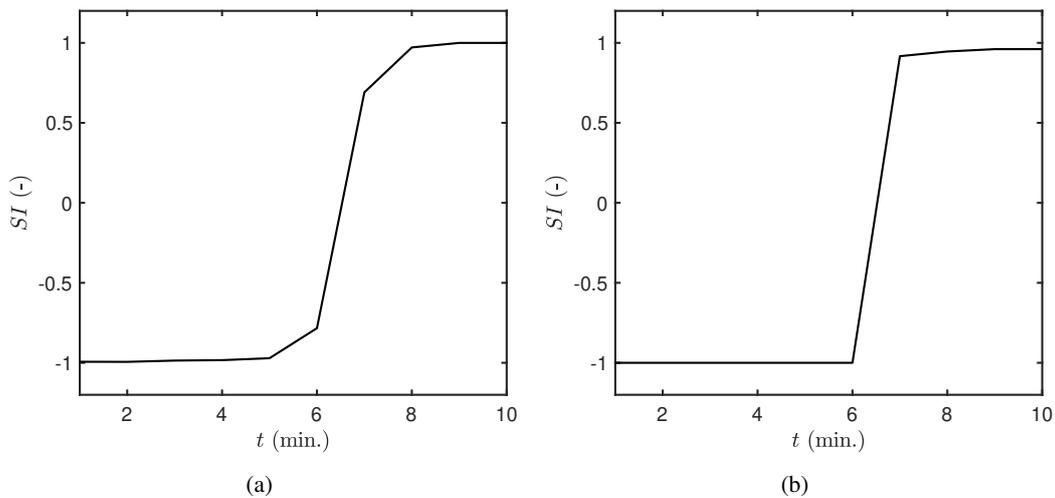


Figure 4.17 – Indice de sévérité de la panne du ventilateur d'extraction pour les données expérimentales en hiver (a) et été (b).

**La rupture de la courroie du ventilateur d'extraction.** La Figure 4.18 fournit l'évolution de l'indice de sévérité dans les minutes entourant l'apparition du défaut. Il est clair que le défaut survient de façon quasi instantané pour les deux cas.

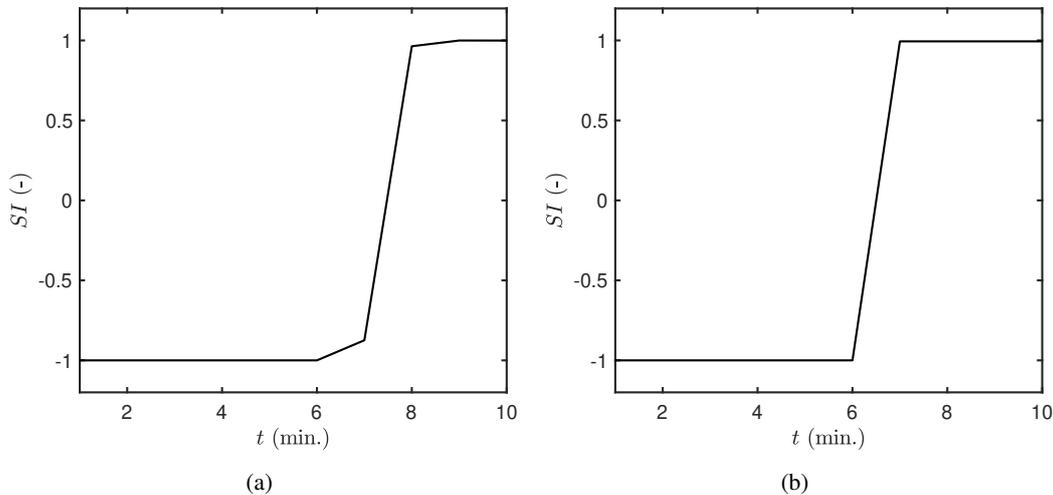


Figure 4.18 – Indice de sévérité de la rupture de courroie du ventilateur d'extraction pour les données expérimentales en hiver (a) et été (b).

#### 4.4.1.2 Les défauts hivernaux

Pour valider les cartes du fonctionnement hivernal et plus précisément le diagnostic des défauts, il a été choisi de projeter deux défauts. Les défauts sélectionnés pour la validation sont la panne de la batterie antigel et de la batterie d'appoint.

**La panne de la batterie antigel.** Sur la Figure 4.19(a) est représentée l'évolution du SI concernant les points qui seront projetés. On constate que la panne de la batterie antigel survient brusquement. Elle passe directement d'une valeur de  $-1$  à  $1$ .

**La panne de la batterie appoint.** L'indice de sévérité de la batterie d'appoint est présenté sur la Figure 4.19(b). Comme pour le défaut concernant l'autre batterie, l'évolution du SI est instantanée. Elle passe d'une condition vierge de tout défaut directement à une condition complètement défectueuse.

#### 4.4.1.3 Les défauts estivaux

Pour valider les zones des défauts d'été de la carte estivale générée, les trois défauts de régulation du bypass vont être projetés. Les valeurs des SI de ces défauts sont présentés en Figure 4.20.

**Défaut de régulation du bypass n°1.** Ce défaut de régulation concerne la non réaction totale du système (non activation du bypass et pas de changement de vitesse). La Figure 4.20(a) présente les valeurs des SI qui seront projetées sur la carte. On constate que la valeur des indices évolue passant de  $-1$  à environ  $0.8$ .

**Défaut de régulation du bypass n°2.** Ce défaut survient lorsque le bypass s'enclenche convenablement, mais que le débit ne varie pas. Les indices de sévérité sont présentés dans la Figure 4.20(b). On constate qu'il y a bien un passage d'un état nominal à défectueux. La valeur minimale du SI est de zéro, et non pas de  $-1$ . Cela correspond bien évidemment à une valeur de

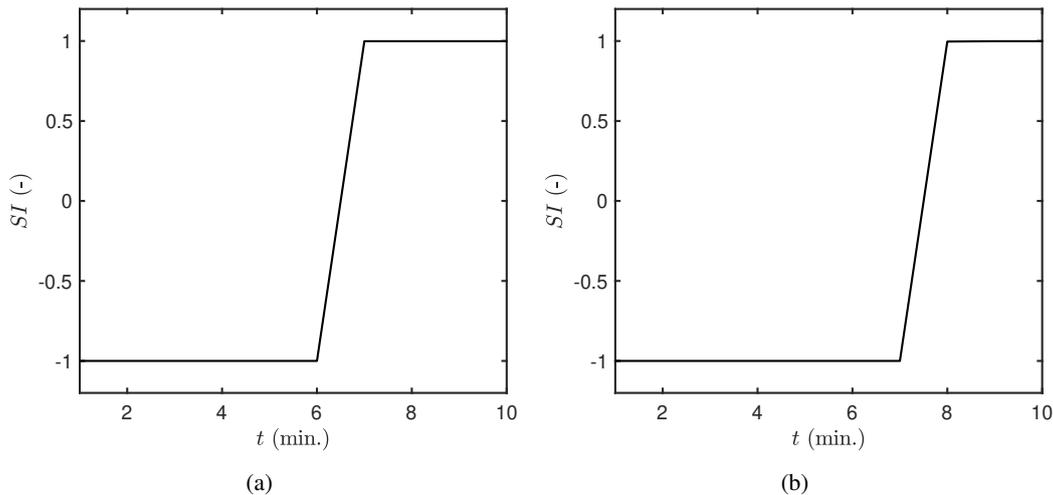


Figure 4.19 – Indice de sévérité pour les données expérimentales de la panne de la batterie antigel (a) et d’appoint (b).

fonctionnent nominal. Le fait que la valeur ne soit pas à  $-1$  vient de la construction et de la sensibilité des règles.

**Défaut de régulation du bypass n°3.** C’est le défaut de régulation qui induit une non activation du bypass mais une variation du débit. La Figure 4.20(c) présente les SI qui seront projetés sur la carte. On constate que les valeurs permettent bien une mise en évidence de l’apparition du défaut. L’indice de sévérité accroît d’une valeur négative de  $-1$  à une valeur de 1.

#### 4.4.2 Projection des résultats

Dans cette section les résultats expérimentaux vont être projetés sur les cartes établies dans la section 4.3.2. Pour cela les indices de sévérité obtenus sur les différents défauts vont être projetés sur les cartes via la méthode RBF. Ainsi les cartes obtenues par modélisation numérique pourront être expérimentalement validées et leur diagnostic assuré.

Cet étape donne un aperçu de ce qui peut être observé en temps réel, en phase de maintenance et d’exploitation lorsque l’outil est implémenté.

##### 4.4.2.1 Les défauts globaux

**Panne ventilateur de soufflage.** La Figure 4.21 présente les résultats de la projection des données de fonctionnement du système lors d’une panne du ventilateur de soufflage. La Figure 4.21(a) est consacrée à la projection sur la carte hivernale. Une évolution du fonctionnement du système peut être observée du fait que les données expérimentales ne soient pas projetées sur la même localisation sur la carte. Il est bien constaté que le système passe d’un fonctionnement nominal à déficient. Les premières projections se situent dans la zone du fonctionnement nominal, au centre de la carte, représentées par des points noirs. Les projections suivantes se déplacent dans cette zone nominale en se rapprochant de fonctionnements défectueux. Les derniers points projetés, ayant une valeur de l’indice de sévérité concernant la panne du ventilateur de soufflage supérieure à zéro, sont dans la zone du défaut. Ils se trouvent même exactement sur l’un des points de la carte.

La Figure 4.21(b) présente la projection des résultats expérimentaux de la panne du ventilateur de soufflage sur la carte d’été. On constate que les points avant l’apparition du défaut se situent bien dans une zone de fonctionnement nominal. Après l’apparition du défaut les points ont dérivé

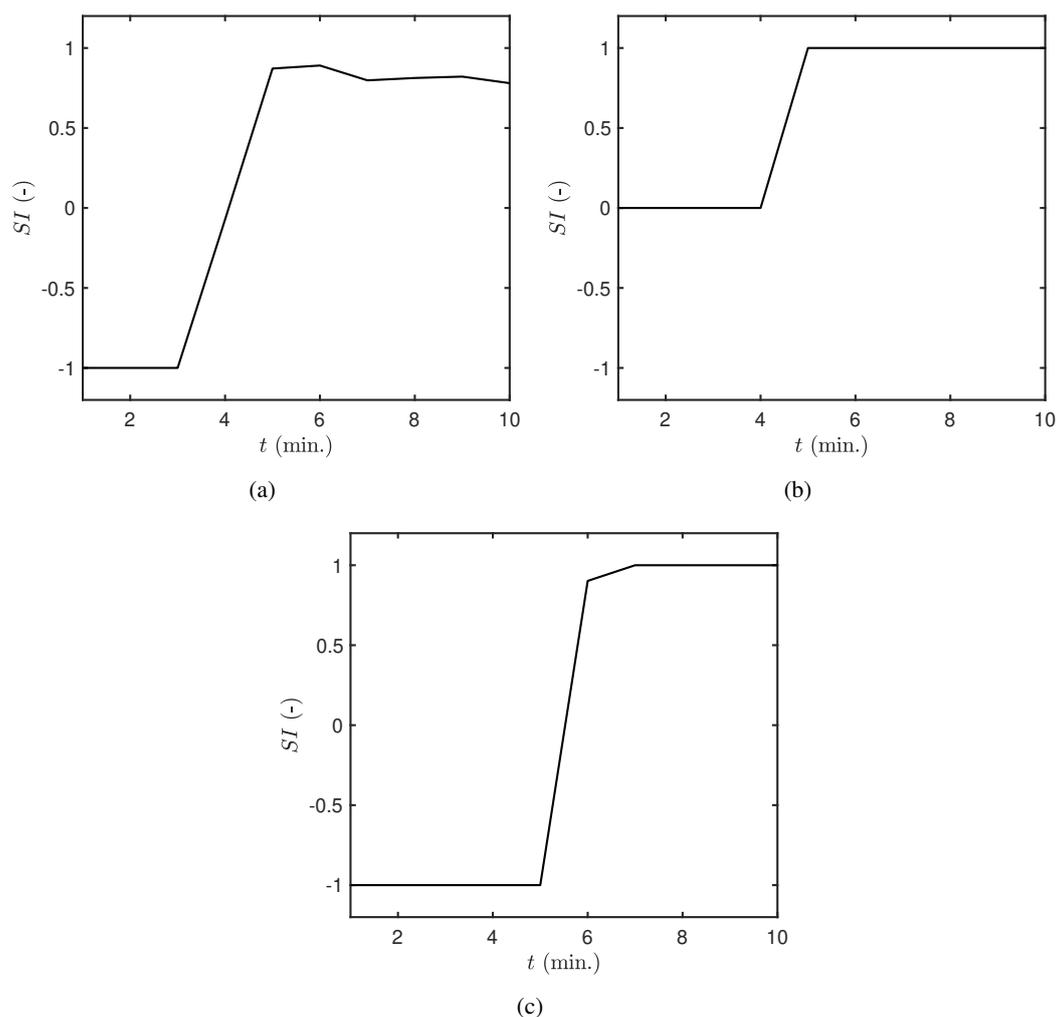


Figure 4.20 – Indice de sévérité pour les données expérimentales du défaut de régulation du bypass n°1(a), n°2 (b) et n°3 (c).

vers la zone allouée au défaut de la panne du ventilateur de soufflage. On constate que tous les points avant et après sont tous superposés. Cela est dû au fait qu'il y a peu de variabilité dans l'évolution des SI de la simulation.

**Panne ventilateur d'extraction.** Les projections des SI du défaut de la panne du ventilateur d'extraction sont présentées dans la Figure 4.22. La Figure 4.22(a) concerne la saison d'hiver. On constate qu'il y a une évolution du fonctionnement du système. Les points possédant uniquement des valeurs de SI négatives sont bien dans l'aire de fonctionnement nominal. On constate que ces derniers se déplacent avec l'augmentation du SI vers la zone du défaut panne du ventilateur d'extraction. Les points avec une valeur de SI positive sont bien dans l'espace dédié au défaut concerné.

La validation du défaut panne du ventilateur d'extraction pour la carte été est présentée en Figure 4.22(b). Les points représentant le fonctionnement du système avant la panne se situent dans un espace de fonctionnement nominal. Ils sont tous superposés car il n'y pas de modification sensible dans l'évolution des SI. Les points après l'apparition du défaut sont localisés dans l'aire de la panne du ventilateur d'extraction. Ils sont projetés exactement sur le point représentant ce défaut. Ils sont également superposés pour les mêmes raisons.

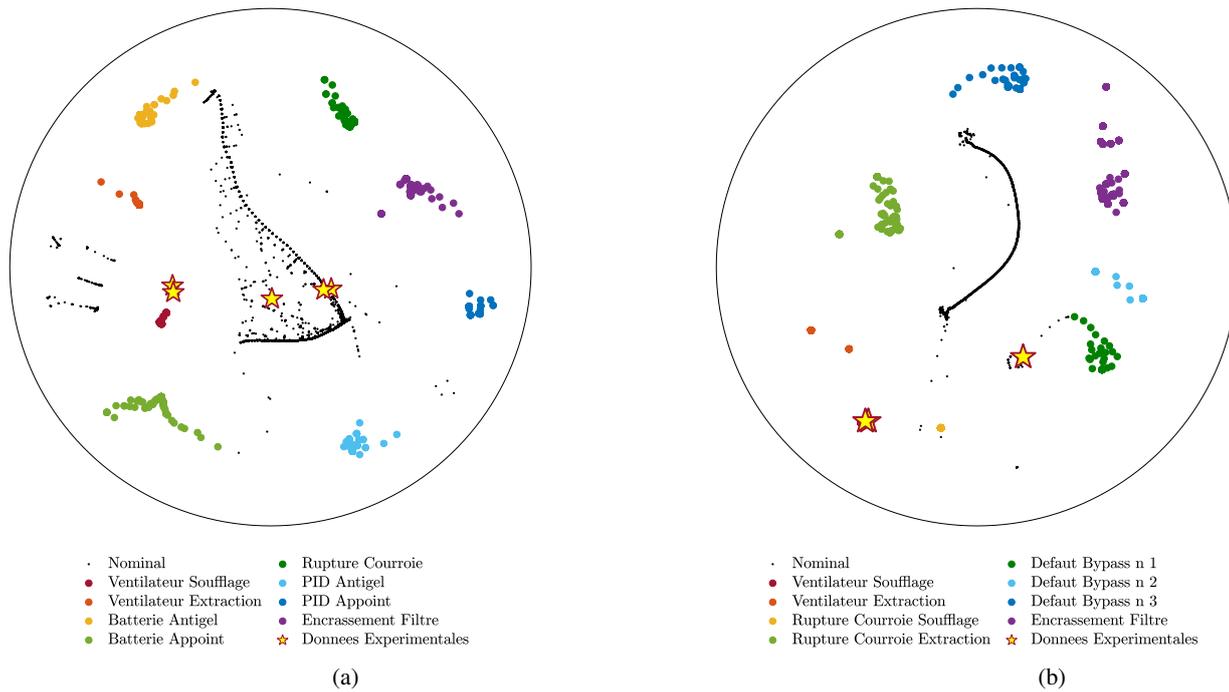


Figure 4.21 – Projection des points expérimentaux de la panne du ventilateur de soufflage sur la carte d’hiver (a) et d’été (b).



Figure 4.22 – Projection des points expérimentaux de la panne du ventilateur d’extraction sur la carte d’hiver (a) et d’été (b).

**Panne Rupture de courroie du ventilateur d'extraction.** Les projections des données expérimentales de ce défaut sur les cartes générées sont présentées dans la Figure 4.23. La Figure 4.23(a) donne les résultats obtenus pour la saison hivernale. Une rupture de la courroie du ventilateur de soufflage est utilisée pour la projection sur cette carte. Les points projetés ne présentant pas de présence de défaut se situent bien au centre du nuage de points représentant le fonctionnement nominal. Plus la valeur du SI augmente plus ils se rapprochent de la zone du défaut de la rupture de courroie. Les points ayant une valeur de SI positive se trouvent bien dans la zone allouée à ce défaut bien qu'ils ne se superposent pas exactement sur un point préalablement représenté.

Une panne de la rupture de la courroie du ventilateur d'extraction est projetée sur la carte d'été. Cette projection est présentée en Figure 4.23(b). Avant l'apparition du défaut les points sont bien projetés dans une zone de fonctionnement nominal. On observe une légère variation de ces points. Les points de fonctionnement en défaut sont exactement situés sur le point représentant la panne de rupture de courroie sur la carte.

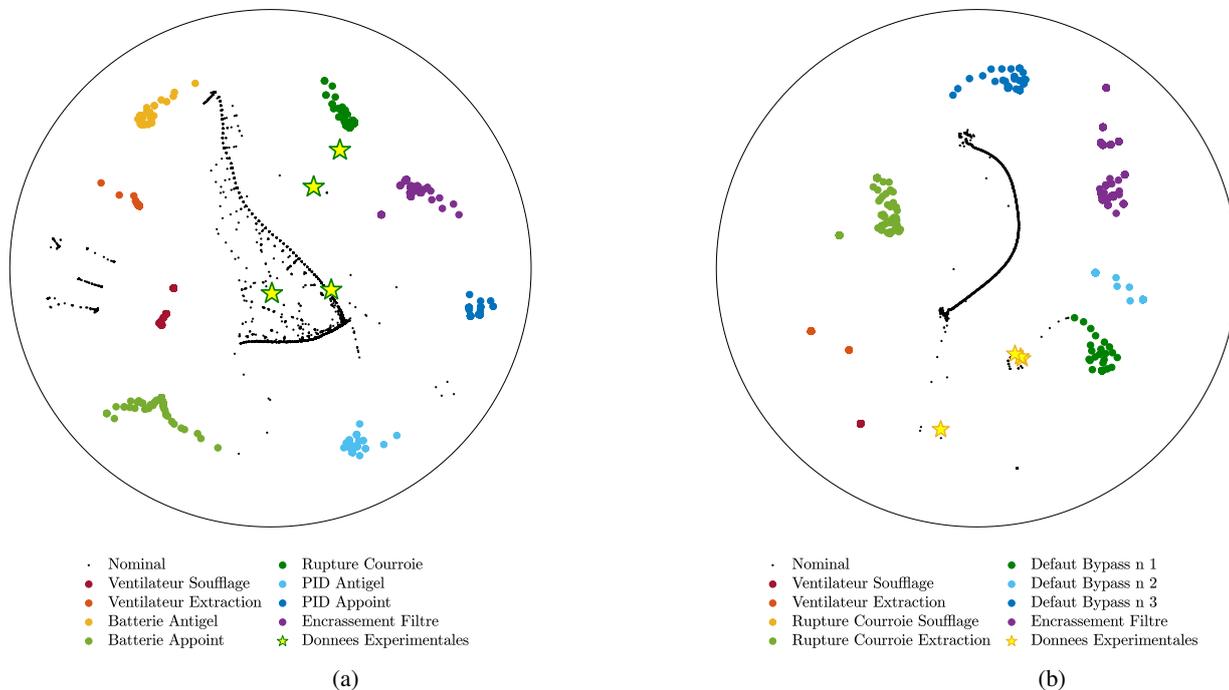


Figure 4.23 – Projection des points expérimentaux d'une rupture de courroie sur la carte d'hiver (a) et d'été (b).

#### 4.4.2.2 Les défauts hivernaux

La validation des zones allouées au défaut hivernaux se fera avec les pannes des deux batteries. Ces projections sont présentées dans la Figure 4.24.

**Panne de la batterie antigel.** La validation par projection de la panne de la batterie antigel est présentée en Figure 4.24(a). Grâce à cette projection, on constate qu'avant l'apparition du défaut, les points projetés sont bien localisés dans l'espace dédié au fonctionnement nominal. Les points possédant une valeur de SI supérieure à 0 se retrouvent bien dans la zone du défaut de panne de la batterie antigel. Les points projetés sont au centre de l'amas de points déjà représentés.

**Panne de la batterie d’appoint.** La Figure 4.24(b) présente la projection des données expérimentales de la batterie d’appoint défaillante traitée par l’algorithme de FDD sur la carte d’hiver. Sur cette carte les points précédant l’apparition du défaut se situent dans l’aire du fonctionnement nominal. Les points pour lesquels le défaut est avéré sont dans la zone allouée défaut de la panne de la batterie d’appoint. L’évolution du SI présenté dans la Figure 4.19(b) ne présente pas plusieurs points d’évolution. Néanmoins, on constate une légère dérive des points dans l’espace de fonctionnement nominal. Ce déplacement des points de fonctionnement est expliqué par la variation faible de SI concernant d’autres défauts.

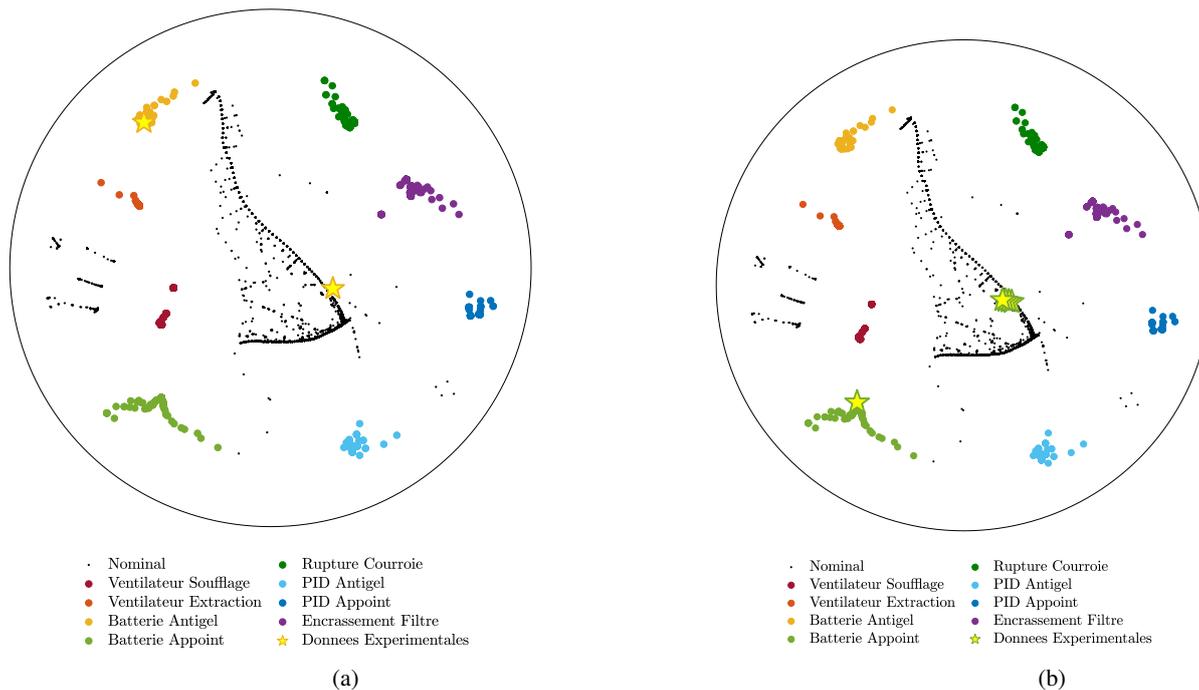


Figure 4.24 – Projection des points expérimentaux d’une panne de la batterie antigel (a) et d’appoint (b).

#### 4.4.2.3 Les défauts estivaux

Les projections effectuées pour valider les défauts hivernaux sont ceux des trois défauts de régulation du bypass.

**Problème de régulation du bypass n°1.** La Figure 4.25(a) présente les indices de sévérité des résultats expérimentaux du premier défaut de régulation du bypass, projetés sur la carte d’été. Lorsque les valeurs du SI sont inférieures à zéro, les projections sont regroupées dans l’une des zones de fonctionnement nominal. Une fois l’indice de sévérité positif (le défaut est donc avéré), les points sont projetés dans l’espace de représentation du défaut n°1 du bypass. On constate que les points sont projetés sur plusieurs emplacements dans l’aire du défaut, en raison des variations comprises dans les SI du modèle et des points expérimentaux.

**Problème de régulation du bypass n°2.** La projection des points expérimentaux du second problème de régulation du bypass est présentée en Figure 4.26. Avant l’apparition du défaut les valeurs expérimentales sont bien projetées dans les aires de fonctionnements nominaux. Les points se rapprochent de la zone du problème de régulation du défaut 2 sans entrer dans l’aire définie.

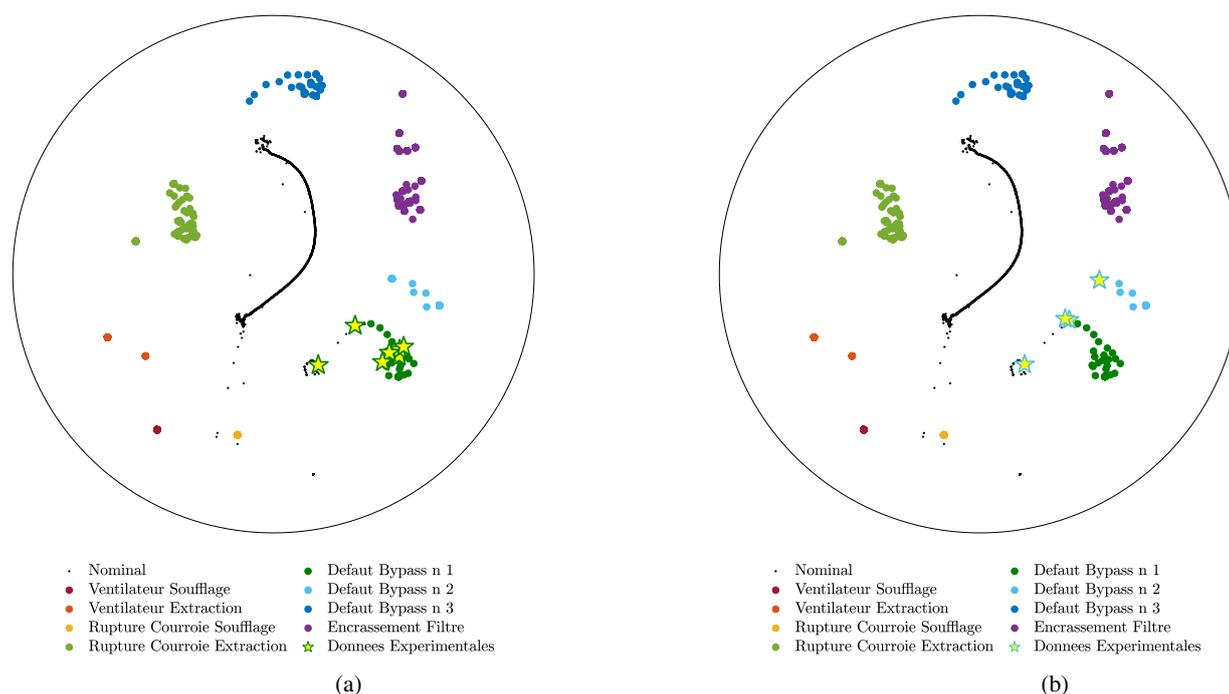


Figure 4.25 – Projection des points expérimentaux de défaut de régulation du bypasse n°1 (a) et n°2 (b).

Cela est dû aux variations des valeurs des indices de sévérité des autres dimensions. Lorsque le défaut est présent, les points projetés se superposent à un point existant de l'espace du défaut de régulation n°2 du bypasse.

**Problème de régulation du bypasse n°3.** La validation par projection du dernier défaut de régulation du bypasse est présentée en Figure 4.26. Les points projetés ayant une valeur de l'indice de sévérité négative se situent en deux localisations différentes. C'est deux coordonnées se situent dans la zone d'un fonctionnement nominal du système. Cette modification de position s'explique par l'évolution des valeurs des SI dans les autres dimensions. Les points présentant la présence avérée d'un défaut sont bien projetés dans l'emplacement du problème de régulation n°3 du bypasse. Tout ces points se superposent.

Grâce à cette étape de validation des cartes élaborée à partir des données numériques, nous constatons que la méthode de détection de défaut est opérationnelle. Des cartes établies en amont de la mise en place d'un système peuvent permettre la mise en évidence de défaut de système réel. Cette validation de l'outil a pu être réalisée grâce à la projection des données expérimentales générées au Chapitre 2.

## 4.5 Conclusion

Dans ce Chapitre, la méthode de détection de défauts a été testée dans les conditions d'un commissionnement initial. Dans ce cas, le bâtiment est en phase de construction. Aucune donnée

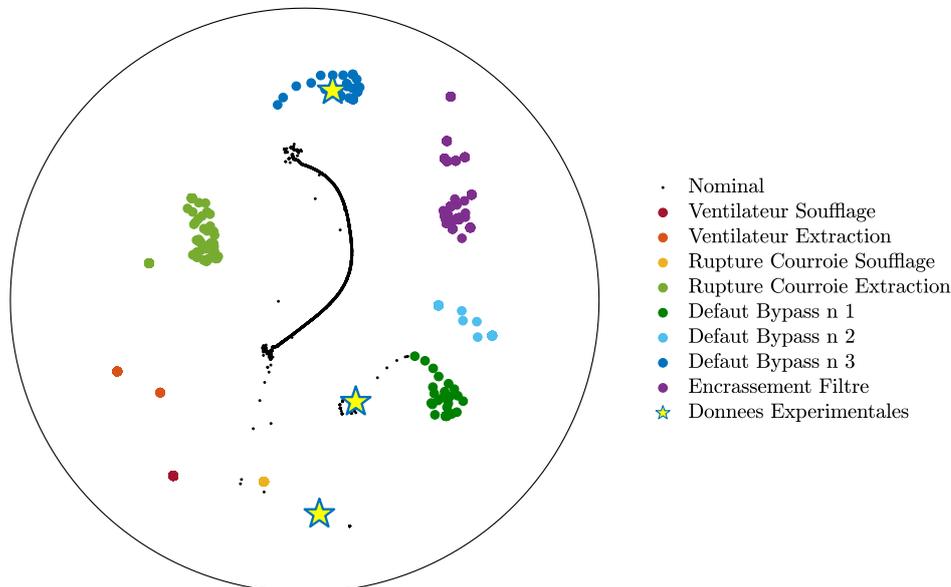


Figure 4.26 – Projection des points expérimentaux de défaut de régulation du bypasse n°3.

concernant son fonctionnement n'est alors disponible. C'est pourquoi il a été choisi d'utiliser la modélisation pour générer les données du bâtiment et du système de CTA en utilisant le logiciel EnergyPlus. Le choix de ce logiciel a été fait pour plusieurs raisons. D'une part, car c'est un logiciel qui permet la modélisation de défaut. De plus, il est utilisé en ingénierie comme en recherche.

Le système ayant deux principaux modes de fonctionnement, une simulation pour chaque saison a été effectuée. Chacune de ces modélisations possède des défauts saisonniers et globaux, pouvant survenir tout au long de l'année. Un total de 12 défauts différents a été modélisé ainsi que quelques défauts couplés. Ces défauts numériques ont été validés par analyse des résultats de la modélisation. En effet, il est nécessaire de s'assurer de la qualité des données devant servir à l'entraînement de l'outil de FDD (*Ground truth*). Ensuite des règles expertes ont été créées pour détecter et pouvoir diagnostiquer les défauts de la simulation.

Les résultats de la modélisation ont été traités par les règles expertes pour en sortir huit indicateurs de sévérité par saison. Chacun de ces indicateurs constitue une dimension de l'espace d'origine. Une réduction de dimension via la méthode ASKI a été réalisée sur les huit dimensions de chaque saison.

Les cartes réalisées ont montré une grande praticité pour la mise en évidence des défauts et leur diagnostic. Le fonctionnement nominal du système se situe au centre de l'espace de représentation. Il est encerclé par les différents défauts. L'identification des défauts est simple du fait d'un bon isolement des différents clusters représentant les défauts. L'arrivée d'un défaut peut être vue par la dérive d'un point de fonctionnement du système de la zone nominale vers une aire déficiente. De plus les *soft faults* (comme l'encrassement des filtres) peuvent être détectées et la gravité estimée grâce à cette représentation.

Ensuite, ces cartes ont été soumises à une validation grâce aux données expérimentales générées au Chapitre 2. Ces résultats expérimentaux ont été projetés sur les cartes générées. Ainsi les zones de fonctionnement nominal comme de défaut ont été corroborées par les résultats expé-

rimentaux. Les projections du cas de référence expérimental ont montré une bonne fiabilité des cartes. L'espace de représentation généré par la méthode permet une détection de défauts précise.

Dans ce Chapitre l'outil de FDD a montré sa capacité à détecter et diagnostiquer efficacement des défauts. La preuve de l'efficacité de cette méthode dans le cas d'une implémentation sur bâtiment neuf a également été présentée. L'établissement d'une carte sur des données numériques permet, après validation par un jeux de référence, la création d'un outil de FDD performant.

Il a également pu être apprécié que l'outil soit orienté utilisateur et *automatisé* (au sens de l'AFDD). En effet, un opérateur de maintenance ou un gestionnaire n'aura à analyser que les projections sur les cartes. Cette analyse se résume à la vérification que les projections se situent dans les zones de fonctionnement nominal. Aucune manipulation n'est nécessaire pour obtenir le diagnostic du système. Les problématiques de qualification liées à la complexité de l'analyse des différentes données sont résolues.

Toutefois, cet outil requiert quelques précautions. Comme il a pu être constaté, les modélisations numériques n'offrent pas toujours des données permettant la réalisation de cartes optimales. Par exemple certains espaces ne sont pas assez représentés (*e.g.* défaut de panne du ventilateur d'extraction pour la carte été). De plus des travaux supplémentaires devront être réalisés sur les logiciels de simulation énergétique dynamique. Les possibilités en terme de modélisation des défauts restent encore à ce jour relativement limitées.

Néanmoins, l'un des avantages de cet outil de détection de défaut réside dans le fait que de nouvelles données peuvent venir alimenter la création de nouvelles cartes. Dans le cas d'ICx par exemple, des nouvelles cartes pourront être réalisées avec les données collectées durant la première année de fonctionnement. Ainsi les cartes pourront être plus précises et permettre le diagnostic de nouveaux défauts n'ayant pas été implémentés en premier lieu.

Ainsi la possibilité d'implémenter la méthode de FDD développée dans le cas d'un commissionnement initial (soit sur bâtiment neuf), a été démontrée. Désormais le cas d'étude concernant le déploiement de cet outil sur un bâtiment existant va être traité. Ce cas correspond à la mise en place de la méthode de FDD lors d'une mission de commissionnement continu.



# 5

## Évaluation de la méthode de FDD sur un cas de commissioning continu

---

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>140</b>
<b>5.2</b>	<b>Le contexte</b>	<b>140</b>
5.2.1	L'objectif	141
5.2.2	La problématique	142
<b>5.3</b>	<b>Le cas réel de bâtiment</b>	<b>143</b>
5.3.1	L'environnement	143
5.3.2	Les défauts	145
<b>5.4</b>	<b>Les Résultats</b>	<b>147</b>
5.4.1	La phase de pré-traitement	147
5.4.2	L'analyse des résultats	150
5.4.3	Cartes finales à destination des équipes techniques	157
<b>5.5</b>	<b>La validation</b>	<b>160</b>
5.5.1	Les donnée	160
5.5.2	Projections	160
<b>5.6</b>	<b>Remarques complémentaires et conclusion</b>	<b>171</b>

---

## 5.1 Introduction

Ce Chapitre a pour objectif de mettre en évidence l'efficacité de l'outil développé sur un cas de commissionnement continu (CCx). Cette étude est réalisée sur des données de bâtiment existant.

Dans un premier temps le contexte de cette étude est détaillé, le bâtiment ainsi que ses systèmes sont présentés et les données utilisées sont analysées. Dans un deuxième temps, les détails concernant les règles et les paramètres de la méthode de FDD sont explicités. Une analyse des différentes étapes de la phase d'ingénierie amont réalisées dans cette étude est présentée.

Une troisième partie porte sur l'exécution de la méthode de FDD sur les données de bâtiment réel. L'une des années de fonctionnement historique du bâtiment est utilisée afin de générer les cartes. Les résultats des outils de détection de défauts sont montrés et analysés pour mettre en évidence les nouveaux potentiels de la méthode. Un fois les cartes réalisées, une validation de l'efficacité de la méthode sera réalisée. Une seconde année de fonctionnement historique du bâtiment est utilisée et projetée sur les cartes établies préalablement. Ainsi, la capacité de l'outil à mettre en évidence les défauts compris dans cette seconde année de fonctionnement pourra être évaluée. La Figure 5.1 présente une illustration de la méthodologie utilisée pour étudier les capacités de l'outil sur un cas de commissionnement de bâtiments existants.

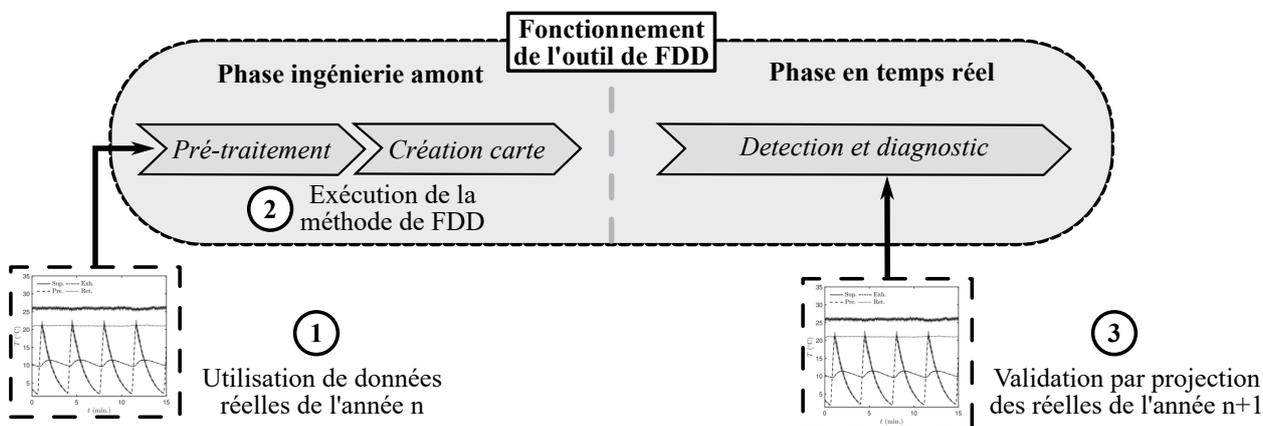


Figure 5.1 – Méthodologie d'évaluation de l'outil de FDD pour le cas d'un commissionnement sur bâtiments existants.

## 5.2 Le contexte

Généralement les outils de détection de défauts sont installés dans des bâtiments existants et possédant préalablement des dispositifs de GTB. La mise en place de ce type de système a souvent lieu dans des bâtiments dont les propriétaires ont des préoccupations en terme d'économie d'énergie. Les raisons principales sont de parvenir à une réduction des coûts (liés aux consommations) et d'atteindre les attentes en terme d'efficacité des systèmes, qui sont de plus en plus complexes [83]. C'est pourquoi ces implémentations ont souvent lieu suite à des missions de Retro ou Re-commissioning, ou lors de la mise en place de commissionnement continu. Ainsi, les outils se basent sur les données réelles du bâtiment et spécialement de ses systèmes pour effectuer les détections et les diagnostics.

Dans des cas de Retro-Cx ou même de RCx ces outils d'aide au commissionnement doivent pouvoir mettre en évidence les problèmes dus aux mauvais réglages des systèmes (de type *control faults*). Puis s'ils sont implémentés dans le cas d'aide aux équipes d'O&M ou d'aide au commis-

sionnement ils devront être en mesure de détecter l'apparition des nouveaux défauts.

Lors des situations de CCx, ces outils servent à automatiser les actions de commissionnement, ils sont des outils d'aide au suivi. Bien évidemment, ils doivent également permettre la mise en évidence de l'apparition de tout autre type de nouveaux défauts.

Lorsque les outils de FDD sont implémentés, il existe trois principaux cas relatifs aux caractéristiques de l'outil. Soit ces outils sont spécifiques à ce système, c'est à dire qu'ils ont été développés pour une configuration de système particulier (avec des composants et des capteurs spécifiques). Dans ces cas, ils effectuent un nombre limité de détections mais en revanche ils n'ont peu ou pas besoin d'être entraînés sur les données. Mais en général ce type d'outil peine à être largement utilisé.

Soit ils sont génériques, dans le sens où ils peuvent être utilisés sur un type de système malgré des différences entre les configurations. Dans ce cas l'outil a parfois besoin d'être entraîné, mais le nombre et la précision des diagnostics sont limités. En effet, les spécificités du système ne seront pas bien prises en compte du fait du caractère généralisable de l'outil.

Soit l'outil est adapté au système étudié, ce qui demande donc une phase de développement et adaptation de l'outil au système. Dans ce cas ces outils auront besoin d'être calibrés pour pouvoir fonctionner efficacement. En revanche, ils pourront être optimisés pour le fonctionnement du système étudié.

Le cas de notre outil rentre dans la catégorie des outils adaptés au système. Il a donc besoin de données relatives au fonctionnement du système (nominal comme défaillant) afin d'être entraîné. Ainsi il sera en mesure de pouvoir identifier l'apparition des défauts propres à ce système.

L'un des avantages de cet outil est qu'il permet d'être mis en place avec n'importe quelle configuration de capteurs. Dès lors, il peut être installé sur tout système de GTB existant sans aucune nécessité d'ajout de capteurs. Néanmoins, la qualité des résultats obtenus et la précision des détections dépendent bien évidemment des sondes mises en place. De plus, la détection de défauts nécessite la connaissance d'informations spécifiques, ce qui sous entend qu'il est probable que dans une conception donnée, plusieurs défauts ne puissent pas être mis en évidence sans l'ajout de capteurs complémentaires. En somme, l'outil ne nécessite aucun ajout de capteurs pour être implémenté, mais les attentes du MOA peuvent rendre l'augmentation du nombre d'informations à relever indispensable. Cela se produit lorsque le nombre et la qualités des détections à fournir n'est pas réalisable avec la configuration actuelle du système.

### 5.2.1 L'objectif

L'objectif de ce chapitre est de montrer la possibilité d'implémentation de l'outil développé et l'employabilité de la méthode dans le cas d'un bâtiment existant. Tester la méthode sur un bâtiment comportant des systèmes déjà mis en place et sans possibilité d'ajout de capteurs représente le cas le plus complexe. En effet, la méthode doit complètement s'adapter à l'existant et être optimisée sans possibilité d'amélioration du réseaux de capteurs. Ce type de situation en plus d'être la plus défavorable est relativement courante. Ainsi sous ces conditions, la praticité et le caractère adaptable de la méthode pourront être validés.

Pour illustrer le cas d'une implémentation de l'outil dans le cadre d'un commissionnement continu, des données réelles de bâtiment vont être utilisées. De cette manière il pourra être prouvé que l'outil fonctionne sur un cas réel de bâtiment. L'utilisation de véritables données issues de GTB montrera que l'outil est en mesure d'être mis en place dans un dispositif de suivi du bâtiment.

Dans cette étude aucune implémentation de capteurs n'a été réalisée afin d'étendre ou d'améliorer les possibilité de détection et de diagnostic de l'outil. Il sera donc jugé de la capacité de l'outil à mettre en évidence de l'information intéressante. Ainsi ce type d'utilisation peut être préconisé à des fins d'assistance au suivi du bâtiment ou à de l'aide pour des missions de commis-

sionnement continu.

Ce chapitre permet également de valider que l'outil développé puisse être mis en place dans les cas de commissionnement continu en plus des cas de commissionnement initial. En effet, aujourd'hui encore il est mis en évidence que des progrès doivent être faits dans ce domaine. Les outils de FDD ou d'aide au commissionnement sont trop souvent attachés à l'une de ces deux catégories et donc ne peuvent pas être utilisés durablement durant un processus de Cx complet [15]. Soit ils permettent de mettre en évidence des défauts de réglage, équilibrage, régulation *etc* mais pas de détection en continu et sont utilisés en ICx, Retro-Cx et RCx. Soit ils s'occupent uniquement de la mise en lumière des *hard* ou des *soft faults* durant le fonctionnement du système et sont alors utilisés en CCx.

## 5.2.2 La problématique

Lorsque l'on traite de l'information, il convient d'estimer la qualité de cette dernière. Par exemple dans le domaine du bâtiment les processus comme le commissioning s'attachent à optimiser la qualité de cette dernière ainsi que sa conservation et son transfert. Bien que l'intégralité de ces données soient importante et utile (pour des raisons de traçabilité, de maintenance *etc*), lors de travaux d'analyse des performances en occupation toutes ces données ne possèdent pas la même valeur. C'est pourquoi une hiérarchie de la qualité des sources d'information dans le domaine du bâtiment a été créée [23]. Cette classification est présentée en Figure 5.2. Elle donne la fiabilité des données à utiliser en partant des réglementations comme étant la moins sûre et place les données des GTB au sommet la pyramide.

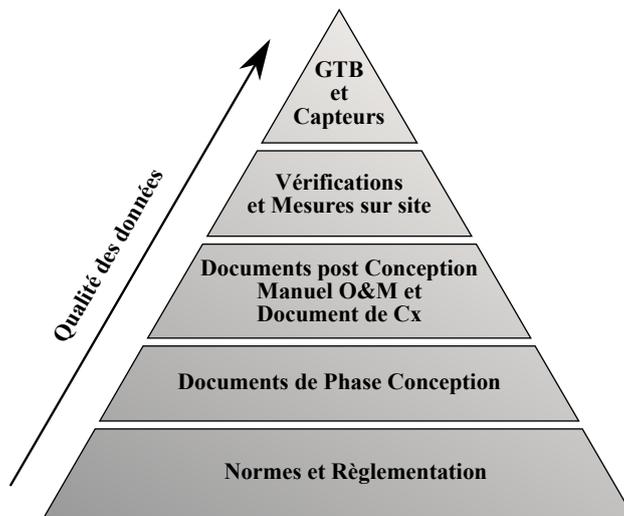


Figure 5.2 – Hiérarchie des sources d'information.

Ce type de classification peut laisser entendre que les données obtenues par mesure peuvent être utilisées en toute confiance. Néanmoins, l'un des problèmes majeurs du suivi des bâtiments concerne justement la qualité des données. En effet, les données recueillies au sein des dispositifs de suivi bien qu'elles soient considérées comme étant les plus fiables de toute la structure des sources d'informations, sont en réalité elles aussi imparfaites. De nombreux problèmes peuvent être relevés quant à la qualité des données *in situ*. Un problème de fiabilité peut être mis en avant, dans le sens où bien que les capteurs possèdent des incertitudes celles-ci sont rarement directement accessibles aux utilisateurs finaux. Ces données comportent aussi des problèmes liés aux technologies des capteurs, comme avec des dérives de certains capteurs ou des saturations dans les mesures. Il existe également des problèmes quant aux communications entre les divers équipements de la chaîne d'enregistrement entraînant les manques dans les données. Ou encore des

problèmes de sauvegarde ou de stockage de ces données. De plus, les données brutes ne révèlent qu'un état du système ou du bâtiment à un instant donné. Leur analyse pour être fiable doit par exemple être effectuée suite à des entretiens avec les personnels techniques ou d'O&M.

On constate que bien que les données des systèmes de relevé soient considérées comme les plus fiables concernant les informations accessibles d'un bâtiment, ces dernières doivent également être utilisées avec prudence.

## 5.3 Le cas réel de bâtiment

Dans cette section va être présenté le cas où la méthode a été testée pour illustrer son implémentation en commissionnement continu. Dans un premier temps, l'environnement sera présenté, c'est-à-dire le bâtiment et le milieu dans lequel il est implanté. Puis ensuite la présentation portera sur les systèmes mis en œuvre dans ce bâtiment pour la gestion des conditions intérieures. Les données concernant ce bâtiment ont été obtenues par le Centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA). Pour des raisons de confidentialité, ce bâtiment ne sera pas cité ou identifié mais toutes informations importantes à la compréhension de l'étude seront fournies.

### 5.3.1 L'environnement

Le bâtiment est situé en France, à l'ouest du département du Morbihan. Il est situé dans une région littorale, sous un climat tempéré chaud sans saison sèche. Cet environnement correspond à une zone *cfb* d'après la classification de KÖPEN [140] et à la zone climatique H2<sub>a</sub> selon l'annexe 1 du 28/12/12 relatif à la RT2012 [126].

#### 5.3.1.1 Le bâtiment

Le bâtiment étudié fait parti d'un complexe de traitement des déchets, construit il y a une dizaine d'années, sous la RT2005 mais ayant reçu le label BBC (équivalent RT2012). Ce projet est composé de deux parties, la première de *ca.* 500 m<sup>2</sup> concernant des locaux techniques et la seconde abritant la zone habitable. La partie dite de locaux techniques ne sera pas étudiée ici. Le bâtiment accueillant la zone habitable est composé des bureaux des employés, d'une salle à manger, d'une entrée, de vestiaires et de sanitaires, répartis sur une surface d'environ 350 m<sup>2</sup>. Un plan de masse du site est présenté dans la Figure 5.3.

Les moyens constructifs principaux sont les suivants. Les murs de façade du bâtiment sont construits monomurs, les refends en aglo ou banchés, l'isolation thermique est donc répartie. Le plancher bas est une dalle en béton armé sur vide sanitaire isolé en sous face (polystyrène). La toiture est constituée d'un bac acier également isolé en sous face (laine de verre). L'intégralité des vitrages mis en place sont des doubles vitrages.

Concernant l'utilisation et l'occupation de ce bâtiment, elles ont été fournies par le gestionnaire du bâtiment. Selon ce dernier, le site est en occupation 14h00 par jour, six jours par semaine de 6h00 à 20h00. Un total de 23 personnes travaille dans ce bâtiment et seulement 17 personnes par jours sont présentes sur le site, en se relayant durant la journée.

#### 5.3.1.2 Les systèmes

Plusieurs systèmes sont mis en place dans ce centre de gestion des déchets, un schéma simplifié les présente en Figure 5.4. Concernant la production, cette dernière est assurée grâce à cinq sondes géothermiques verticales raccordées à une pompe à chaleur fournissant une puissance de

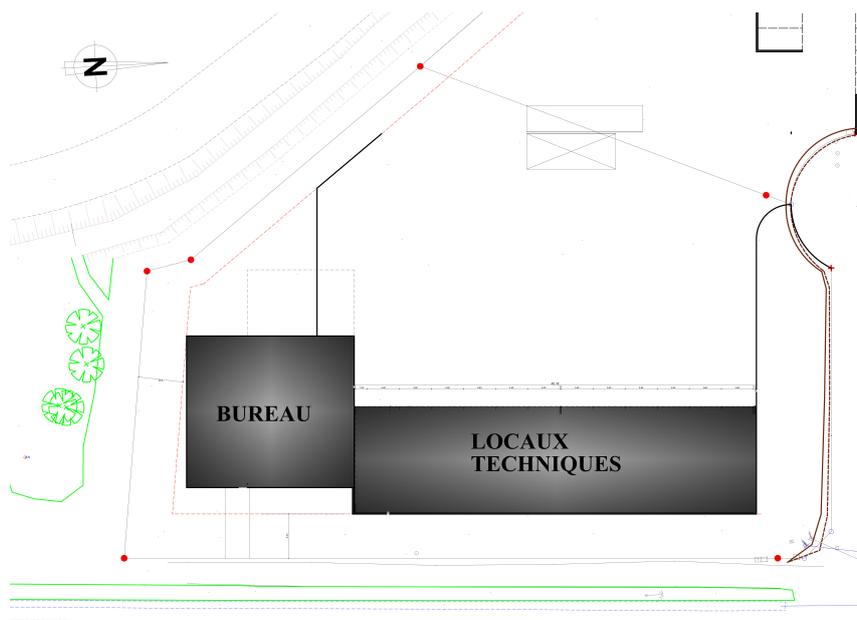


Figure 5.3 – Plan de masse du site.

15 kW. La pompe à chaleur est raccordée un réseau primaire jusqu'à une bouteille de découplage alimentant trois réseaux distincts : un réseau raccordé au ballon d'eau chaude, un réseau alimentant les planchers chauffants et un troisième qui dessert des radiateurs thermostatiques et une batterie d'eau chaude. Le ballon d'ECS est également alimenté par des capteurs solaires. La ventilation des locaux est assurée par un système de ventilation mécanique contrôlé de type double flux avec récupération de chaleur sur air extrait. L'échangeur est de type contre courant et certifie un rendement de 60 %. L'air soufflé est également préchauffé grâce à une batterie d'eau chaude (alimentée par la PAC). Le bâtiment est également pourvu d'une surface de 140 m<sup>2</sup> de panneaux solaires de type mono-cristallin.

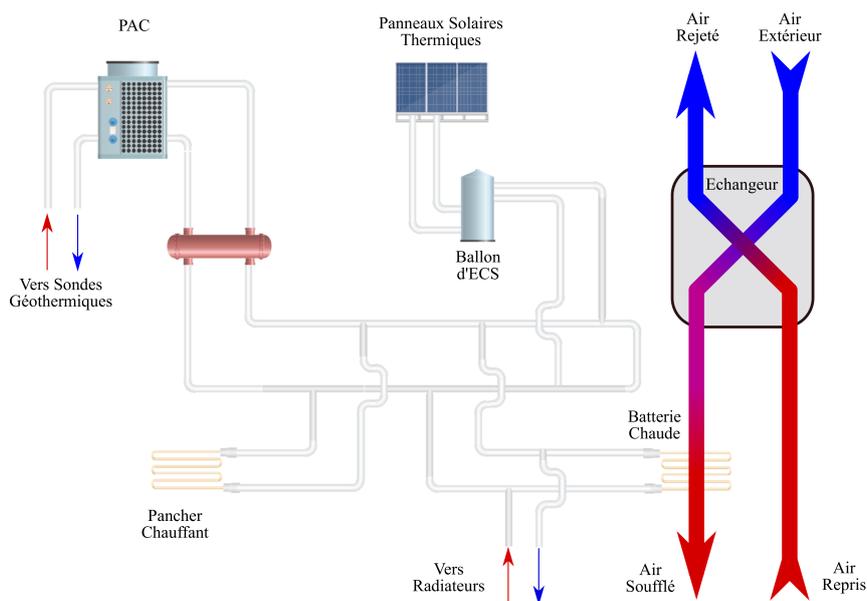


Figure 5.4 – Schémas simplifié des installations.

### 5.3.1.3 Les données

Dans le cadre de l'étude de ce bâtiment un certain nombre d'informations nous ont été fournies. Premièrement des informations d'ordre général sur le bâtiment, ses systèmes et sa construction dont les informations importantes ont été synthétisées ci dessus. Concernant les données du bâtiment, deux années de mesures ont été mises à notre disposition, l'année 2013 et 2014. Ces mesures comportent seulement deux types d'informations différentes, des relevés d'énergie et de température. Les points de comptages d'énergie fournis sont des informations sur les différentes branches des réseaux d'émission (plancher chauffant, échangeur du ballon et radiateurs avec batterie), ainsi que les productions solaires et photovoltaïques. Les mesures de température ont été relevées en trois points de la CTA, la température d'air pré-chauffé à la sortie de l'échangeur, la température de soufflage et la température d'air rejeté. À ces trois températures d'air de la CTA viennent s'ajouter les températures intérieures des pièces et une température extérieure. Les variations de températures enregistrées durant ces deux années de relevé sont présentées dans la Figure 5.5. Cette Figure donne les densités de probabilité des températures extérieures et intérieures enregistrées sur ces deux années. On constate que les distributions des températures extérieures durant cette période sont similaires.

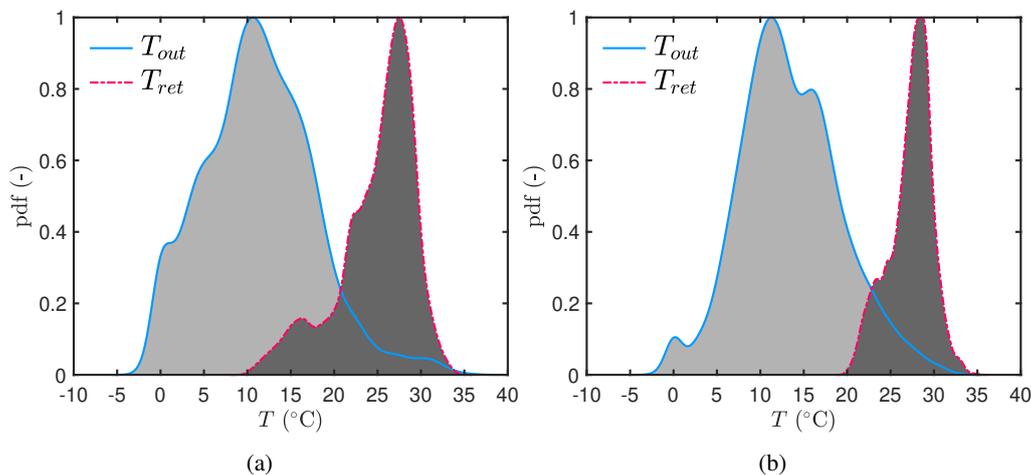


Figure 5.5 – Densité de probabilité des températures pour l'année 2013 (a) et 2014 (b).

Les données du bâtiment réel obtenues ont été analysées afin que l'année la plus pertinente soit sélectionnée pour l'élaboration des cartes. C'est l'année 2013 qui a été retenue. Néanmoins, ces données n'étaient pas exemptes de tout problème. En effet, comme cela se produit régulièrement lors de tout enregistrement de données, des anomalies ont été rencontrées lors des relevés. Par exemple, lors de l'année sélectionnée, le capteur de température extérieure a saturé lors de plusieurs mesures.

## 5.3.2 Les défauts

### 5.3.2.1 Les hypothèses

Il semble important de préciser qu'il ne fut pas possible de se déplacer sur le site pour effectuer une inspection des locaux et des systèmes comme le nécessite généralement ce genre d'intervention. De plus, aucune rencontre ou entretien avec les personnels techniques de ce bâtiment n'a malheureusement pu être mise en place. Ainsi, certaines hypothèses concernant l'utilisation du bâtiment ont dû être posées afin de pouvoir l'étudier. Par ailleurs, il est à noter qu'aucun *ground truth* n'a été établi concernant les données obtenues.

C'est pourquoi des hypothèses issues d'un travail d'analyse des données reçues, ont été posées

afin de pouvoir réaliser l'étude de cas. Ainsi les températures de consignes (de l'air ambiant ou de la température de soufflage) ont été déterminées via l'analyse des températures. Il en ressort que le bâtiment possède des réduits nocturnes comme le montre l'analyse des températures intérieures et de soufflage en Figure 5.6.

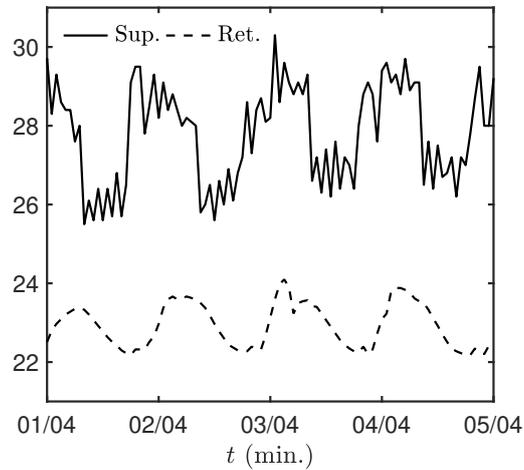


Figure 5.6 – Évolution des températures de soufflage et intérieure dans le bâtiment.

### 5.3.2.2 Le sujet d'étude

Du fait du manque d'informations concernant le bâtiment et son utilisation, les systèmes et leurs contrôles mis en place etc, nous possédons une faible connaissance de l'environnement à étudier. Par ailleurs, les informations relevées sur le système sont relativement peu nombreuses.

Il a été choisi d'orienter l'utilisation de l'outil vers de l'aide au suivi du bâtiment, plus qu'à la détection de défauts (au sens de panne des éléments). De plus, l'analyse des données préalables a permis de révéler peu de défauts à proprement parler du système. Ainsi lors de cette étude, les défauts suivis ne concerneront pas des pannes d'équipements mais plutôt des fonctionnements souhaités ou non du système. C'est-à-dire que dans cette configuration, l'outil développé peut être utilisé par les équipes techniques pour du suivi et par conséquent, pour de l'analyse des conditions intérieures de confort et des missions de pilotage.

Il en ressort que pour cette étude l'utilisation de l'outil développé n'est pas conventionnelle. Il n'est pas utilisé à des fins de détection de défauts comme cela peut être entendu par la communauté de FDD. Aucune panne ne sera mise en évidence dans cette étude. Ce choix de s'adapter est effectué afin de pouvoir tester la méthode sur le jeu disponible. Néanmoins, cette décision ne remet absolument pas en cause les performances de l'outil sur des cas de détection de défauts *conventionnels*. La méthode de l'outil étant identique, la seule différence concerne l'objet d'étude des règles expertes  $\Gamma$ . Dans un cas de FDD conventionnelle (*i.e.* Chapitre 3) l'objectif de la phase de Pré-Traitement est mettre en évidence des *hard faults*, *soft faults* ... Pour y parvenir les données sont manipulées par plusieurs outils ( $\rho$ ,  $\Gamma$ ,  $\sigma$  ...) selon une méthodologie précise. Dans le cadre de ce cas d'étude toutes ces étapes sont maintenues identiques, seuls les comportements à mettre en évidence varient. Ainsi, ce cas d'étude permet de prouver que l'outil est en mesure de détecter et de diagnostiquer des comportements désirés choisis en amont.

### 5.3.2.3 Les défauts

Dans cette section vont être présentés les *défauts* considérés dans ce cas d'étude. Ces *défauts* seront mis en évidence dans le jeu de données à disposition à travers des figures. Les *défauts* pris en compte dans ce travail concernent des états de fonctionnement jugés indésirables. Ainsi, ils

seront présentés selon deux catégories, (i) hiver et (ii) été, en fonction de la saison à laquelle ils se rapportent.

#### 5.3.2.4 Les défauts d'hiver

Un total de 6 défauts sont pris en compte pour la saison hivernale. Le premier concerne une température de soufflage de l'air trop faible. Ce défaut cherche à identifier à quel moment la température d'air doit être chauffée mais que la température de soufflage n'atteint pas la consigne. Le second défaut est nommé température de soufflage trop haute. Il cherche à mettre en évidence une situation qui serait inutilement coûteuse en énergie. Cette situation est définie comme apparaissant lorsque la température de soufflage est supérieure à sa consigne. Le troisième défaut met en évidence l'échec des équipements de chauffe. Dans ce cas, il est vérifié que l'air insufflé dans le bâtiment a bien été traité. Le quatrième défaut concerne une chute de l'efficacité. Il met en évidence les situations durant lesquelles l'efficacité du système diminue en dessous d'une valeur de limite inférieure à l'efficacité nominale. Le défaut cinq est appelé retard d'arrêt de la batterie. Cet autre défaut concerne les cas où il n'y a plus de besoin en terme de chauffage mais que la batterie fournit encore des apports. Le dernier défaut d'hiver est la panne de la batterie antigel. Il correspond au cas où la batterie n'est pas alimentée lorsqu'il y a un besoin d'apport. Cela correspond aux situations où la température extérieure est inférieure à 0 °C et que la batterie antigel ne s'allume pas.

#### 5.3.2.5 Les défauts d'été

Dans cette étude, uniquement trois défauts ont été étudiés pour la saison estivale. Le premier défaut est appelé allumage de la batterie. Il correspond à la situation durant laquelle l'air extérieur est chauffé inutilement par la batterie durant la saison d'été. Le second défaut correspond à un défaut du bypass. Les situations durant lesquelles le *free-cooling* n'est pas utilisé sont détectées avec ce défaut. Le dernier défaut d'été étudié concerne un problème dans l'enregistrement des données par saturation d'un capteur.

## 5.4 Les Résultats

Dans cette section les résultats obtenus par l'outil sont présentés. Les étapes pour parvenir à ces solutions sont également développées. Dans cette étude, comme pour celle du Chapitre 4, deux cartes sont réalisées. Chacune de ces cartes est relative à une saison, car les comportements à mettre en évidence sont dépendants des scénarios de fonctionnement. Ainsi les personnels techniques ne manipulent qu'une seule carte à la fois en fonction du type de fonctionnement du système (chauffage ou refroidissement). Les cartes présentées ne sont donc pas polluées par des informations inutiles lors de la période concernée.

Les cartes présentées lors de cette étude sont réalisées sur les points d'une seule année historique. Les cartes étant saisonnières, une sélection de 1000 points représentatifs selon la méthode HASTIE a été retenue pour chaque période de fonctionnement. C'est sur la base de ces 1000 points que les cartes sont élaborées.

### 5.4.1 La phase de pré-traitement

Dans cette section les étapes de la Phase de *Pré-Traitement* qui sont réalisées afin de permettre l'élaboration des cartes vont être présentées. Ces étapes concernent dans un premier temps l'élaboration et la formalisation des règles puis dans un second temps la sélection des points et la

réduction de dimension. La première étape (l'élaboration des règles) est différente pour chacune des saisons, c'est pourquoi elles seront présentées séparément.

#### 5.4.1.1 Pré-traitement de la saison d'hiver

Les défauts à mettre en évidence pour la saison d'hiver sont au nombre de six. Ils sont donc regroupés en six règles ( $\Gamma_i$ ) composées au total par 13 sous règles ( $\rho_{ij}$ ). Chacune des règles et sous règles vont être présentées et l'ensemble des valeurs importantes rappelés dans le Tableau 5.1. On rappellera que les valeurs  $U_\infty$  et  $\beta$  correspondent respectivement aux valeurs de limite et aux coefficients de réduction conformément au formalisme de la méthode présentée au Chapitre 3.

**Règle  $\Gamma_1$  : Température de soufflage trop faible.** La température trop faible de l'air injecté dans le bâtiment est mise en évidence par une conjonction de deux sous règles. La première sous règle s'assure du besoin d'apport vis à vis de la demande en terme de confort. La seconde vérifie que la température de soufflage est suffisante.

$$\rho_{1.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ret} - T_{out} - (-T_{\infty 1.1})}{\beta_{1.1}} > 0. \wedge \rho_{1.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{c_{sup}} - T_{sup} - (-T_{\infty 1.2})}{\beta_{1.2}} > 0. \quad (5.1)$$

où  $T_{out}$  est la température extérieure,  $T_{ret}$  la température intérieure,  $T_{sup}$  la température de soufflage et  $T_{c_{sup}}$  la température de consigne. Les paramètres  $T_{\infty 1.1}$  et  $\beta_{1.1}$  valent respectivement 2 et 2 et  $T_{\infty 1.2}$  et  $\beta_{1.2}$  prennent les valeurs 0 et 0.66.

**Règle  $\Gamma_2$  : Température de soufflage trop haute.** Le défaut concernant une température de soufflage trop forte est définie avec trois règles. La première vérifie l'écart de la température de soufflage à la consigne, la seconde la valeur de la température extérieure et la troisième de la température intérieure.

$$\begin{aligned} \rho_{2.1} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{sup} - T_{ret} - (-T_{\infty 2.1})}{\beta_{2.1}} > 0. \wedge \\ \rho_{2.2} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{out} - T_{2.2} - (-T_{\infty 2.2})}{\beta_{2.2}} > 0. \wedge \\ \rho_{2.3} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ret} - T_{2.3} - (-T_{\infty 2.3})}{\beta_{2.3}} > 0. \end{aligned} \quad (5.2)$$

où le paramètre  $T_{\infty 2.1}$  est égale à 6 et  $\beta_{2.1}$  égale à 0.3. Pour  $\rho_{2.2}$ ,  $T_{2.2}$  vaut 0,  $T_{\infty 2.2} = 12$  et  $\beta_{2.2} = 0.6$ . Concernant la dernière sous règle,  $T_{2.3}$  vaut 0,  $T_{\infty 2.3} = 18$  et  $\beta_{2.3} = 0.6$

**Règle  $\Gamma_3$  : Échec des composants de chauffe.** Cette règle vérifie que l'air extérieur est bien réchauffé avant d'être insufflé dans le bâtiment. Ce contrôle est effectué à l'aide de trois règles. Elles vérifient les conditions intérieures et extérieures ainsi que l'évolution de température dans la gaine.

$$\rho_{3.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ext} - T_{sup} - (-T_{\infty 3.1})}{\beta_{3.1}} > 0. \quad (5.3)$$

avec les paramètres  $T_{\infty 3.1}$  égale à 1 et  $\beta_{3.1}$  égale à 5.

**Règle  $\Gamma_4$  : Chute de l'efficacité du système.** Ce défaut concerne les situations durant lesquelles l'efficacité du système de récupération d'énergie est inférieure à une limite. Ces conditions sont détectées par l'intermédiaire d'une conjonction de deux règles. La première vérifie l'efficacité du système et la seconde vérifie qu'il y a besoin d'apport.

$$\begin{aligned} \rho_{4.1} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{\eta_{4.1} - \eta_{Hex} - (-\eta_{\infty 4.1})}{\beta_{4.1}} > 0. \wedge \\ \rho_{4.2} & \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{4.2} - T_{ret} - (-T_{\infty 4.2})}{\beta_{4.2}} > 0. \end{aligned} \quad (5.4)$$

où  $\eta_{Hex}$  est l'efficacité de l'échangeur de chaleur,  $\eta_{4.1}$  égale à 0,  $\eta_{\infty 4.1}$  égale à  $-0.5$  et  $\beta_{4.1}$  égale à 0.015. Dans la règle  $\rho_{4.2}$ ,  $T_{4.1}$  et  $T_{\infty 4.3}$  valent 0,  $\beta_{4.3}$  est égale à 1.

**Règle  $\Gamma_5$  : Chauffage inutile de la batterie.** Cette situation est mise en évidence par deux sous règles. La première vérifie si la température intérieure a dépassé la consigne et la seconde si la batterie chaude fournit des apports à l'air insufflé dans le bâtiment.

$$\rho_{5.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ret} - T_{c_{ret}} - (-T_{\infty 5.1})}{\beta_{5.1}} > 0. \wedge \rho_{5.2} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ret} - T_{sup} - (-T_{\infty 5.2})}{\beta_{5.2}} > 0. \quad (5.5)$$

avec les paramètres  $T_{\infty 5.1}$  égale à 1,  $\beta_{5.1}$  égale à 2,  $T_{\infty 5.2}$  égale à 0,  $\beta_{5.1}$  égale à 1.

**Règle  $\Gamma_6$  : Panne de la batterie antigel.** Ce défaut est mis en évidence par une règle s

$$\rho_{6.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{6.1} - T_{out} - T_{\infty 6.1}}{\beta_{6.1}} > 0. \quad (5.6)$$

où  $T_{6.1} = 0$ ,  $T_{\infty 6.1}$  est égale à 0,  $\beta_{6.1}$  égale à 0.33.

Tableau 5.1 – Défauts d'hiver du cas de Ccx et leurs règles.

Défauts	Règles	Sous règles	Valeur limite $U_{\infty}$	Coefficient de réduction $\beta$
Température de soufflage trop faible.	$\Gamma_1$	$\rho_{1.1}$	0	2
		$\rho_{1.2}$	1	5
Température de soufflage trop haute.	$\Gamma_2$	$\rho_{2.1}$	5	10
Échec des composants de chauffe	$\Gamma_3$	$\rho_{3.1}$	1	5
		$\rho_{4.1}$	1	1
Retard de mise en marche de la batterie	$\Gamma_4$	$\rho_{4.2}$	0	1
		$\rho_{4.3}$	0	1
		$\rho_{5.1}$	1	2
Chauffage inutile	$\Gamma_5$	$\rho_{5.2}$	0	1
		$\rho_{6.1}$	1	1
Alimentation de la batterie	$\Gamma_6$	$\rho_{6.2}$	0	1

### 5.4.1.2 Pré-traitement de la saison d'été

Concernant la saison estivale, seulement trois règles sont mises en place et sont composées de cinq sous règles. L'ensemble des valeurs de  $U_\infty$  et  $\beta$  pris en compte est synthétisé dans le Tableau 5.2.

**Règle  $\Gamma_1$  : Chauffage de l'air.** Le premier défaut concerne un réchauffage inutile avec la batterie chaude en saison estivale. Il est mis en évidence par l'intermédiaire d'une seule règle. Cette dernière vérifie l'augmentation de la température de part et d'autre de la batterie.

$$\rho_{1.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{sup} - T_{pre} - (-T_{\infty 1.1})}{\beta_{1.1}} > 0. \quad (5.7)$$

où  $T_{\infty 1.1} = -2$  et  $\beta_{1.1} = 1$ .

**Règle  $\Gamma_2$  : Free-cooling non optimal.** Cette règle cherche à déterminer si la grande vitesse du ventilateur est active lors du rafraîchissement passif. La conjonction de trois sous règles permet de mettre en évidence cette situation. Les deux premières règles définissent s'il y a un potentiel de *free cooling*, la dernière si la grande vitesse est active.

$$\begin{aligned} \rho_{2.1} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ret} - T_{out} - (-T_{\infty 2.1})}{\beta_{2.1}} > 0. \wedge \\ \rho_{2.2} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ret} - T_{c ret} - (-T_{\infty 2.2})}{\beta_{2.2}} > 0. \wedge \\ \rho_{2.3} &\stackrel{\text{def}}{:=} \frac{P_{sup} - P_{2.3} - (-P_{\infty 2.3})}{\beta_{2.3}} > 0. \end{aligned} \quad (5.8)$$

où le paramètre  $T_{\infty 2.1}$  est égal à 0,  $\beta_{2.1} = 1$ ,  $T_{\infty 2.2}$  est égal à  $-1$  et  $\beta_{2.2} = 1$ . Le paramètre  $P_{sup}$  correspond à la puissance absorbée par le ventilateur normalisée,  $P_{2.3} = 0$ ,  $P_{\infty 2.3}$  est égal à 1 et  $\beta_{2.3} = 1$ .

**Règle  $\Gamma_3$  : Saturation du capteur.** Ce défaut concerne un problème d'enregistrement du capteur de température extérieure. Ce dernier défaut n'est composé que d'une seule règle vérifiant la variation des températures d'air extérieur.

$$\rho_{3.1} \stackrel{\text{def}}{:=} \frac{T_{ext(tn+1)} - T_{ext(tn)} - (-T_{\infty 3.1})}{\beta_{3.1}} > 0. \quad (5.9)$$

où  $T_{ext(tn+1)}$  est la température extérieure au pas de temps considéré,  $T_{ext(tn)}$  correspond au pas de temps précédent,  $T_{\infty 3.1} = 10^{-6}$  et  $\beta_{3.1} = \frac{(T_{ext(t+dt)} - T_{ext(t)})}{2}$ . où  $dt$  est le pas de temps de mesure.

Toutes les règles permettant de mettre en évidence les comportements souhaités ont été détaillées. Désormais, les données historiques sélectionnées peuvent être traitées par ces règles afin de pouvoir détecter ces situations. Les résultats des règles ( $\Gamma_i$ ) seront ensuite modifiés pour fournir les différents indicateurs présentés au Chapitre 3. À la suite de ces traitements, l'étape d'élaboration des cartes peut être exécutée.

## 5.4.2 L'analyse des résultats

Les résultats obtenus grâce à l'étape de *Pré-Traitement* sont utilisés comme données d'entrée de la méthode de réduction de dimension. Dans cette section nous présenterons les cartes saisonnières générées par l'outil grâce à ces traitements. Ces dernières vont être analysées selon les étapes d'évolution de la carte présentées précédemment. Ainsi le pouvoir de détection et de diagnostic sera détaillé jusqu'à l'élaboration de la carte finale à destination des équipes techniques.

Tableau 5.2 – Défauts d'été du cas de Ccx et leurs règles.

Défauts	Règles	Sous règles	Valeur limite $U_\infty$	Coefficient de réduction $\beta$
Chauffage de l'air	$\Gamma_1$	$\rho_{1.1}$	-2	1
Free cooling non optimal	$\Gamma_2$	$\rho_{2.1}$	0	1
		$\rho_{2.2}$	-1	1
		$\rho_{2.3}$	0.75	1
Saturation capteur	$\Gamma_3$	$\rho_{3.1}$	$10^{-6}$	2

### 5.4.2.1 Les cartes hivernales

Comme expliqué dans le Chapitre 4, la carte initiale produite par la méthode de réduction de dimension ne permet aucune détection. Cette première carte est présentée dans la Figure 5.7. En effet, ces méthodes permettent une représentation de la dispersion des points dans l'espace de grande dimension en  $2D$ . Cette représentation se traduit par la création de clusters représentant des amas de points de l'espace d'origine. En revanche, en analysant la première carte générée dans le cas des données réelles, on constate que cette analyse par cluster s'avère compliquée. En effet, quelques zones peuvent être identifiées mais leur délimitation n'est pas nette. Contrairement aux cartes générées sur les données numériques dont les clusters étaient extrêmement distincts et donc identifiables, pour ce jeu de données ces derniers sont relativement flous. Les frontières entre les différents types de fonctionnements ne sont pas claires. En l'état cette carte ne permet donc de fournir aucune information concernant les données d'origine : ni détection, ni diagnostic, ni même différence de régime de fonctionnement.



Figure 5.7 – Carte initiale d'hiver du cas sur bâtiment existant obtenue par la méthode de réduction de dimension.

Les cartes issues de la méthode de réduction de dimension ne fournissant pas d'information utile dans le cadre de la FDD, ces dernières sont alors traitées. La première information intéres-

sante concerne la différenciation des zones de fonctionnement nominal, défaillant et de couplage de défaut. Cette étape passe par la création d'une seconde carte présentée en Figure 5.8. Afin de mettre en évidence ces trois types de fonctionnement, il va être représenté sur la carte initiale les valeurs des  $\lambda$  de chaque point. Pour rappel, les *indicateur total de sévérité* ( $\lambda$ ) correspondent à la somme des valeurs positives des différents indices de sévérité de chaque défaut ( $\sigma$ ). Pour identifier la valeur l'indicateur total de sévérité, il à été associé à un gradient de couleur. Grâce à cette représentation, les zones exemptes de tout défaut sont représentées en bleu foncé. Les zones possédant au moins un défaut sont symbolisés par un point possédant une couleur allant de la couleur bleu à vert (en fonction de la sévérité du défaut). Pour finir les défauts couplés sont représentés par des losanges ou des triangles (selon s'ils ont respectivement deux ou trois défauts couplés) allant de la couleur bleu à rouge. Pour finir les défauts ayant une valeur de  $\lambda > 1$ , étant donc obligatoirement couplés sont représentés avec des couleurs allant de vert à rouge.

Grâce à cette représentation, on constate que comme pour le cas présenté au Chapitre 4, la zone de fonctionnement nominale se situe bien au centre du nuage de points. Mais également que l'indice de sévérité des points s'accroît avec l'augmentation de la distance des points de zone de fonctionnement nominal. Cette nouvelle carte confirme aussi un phénomène concernant les couplages rencontrés dans une moindre mesure dans le cas des cartes sur données numériques. On constate que des zones de défauts couplées se situent entre les zones de défaut unique. Cela peut être observé par le fait qu'il existe des clusters partant de la zone fonctionnement nominal et allant jusqu'à la périphérie du nuage de points qui ne sont constitués que de points verts (valeur de  $\lambda < 1$ ). Entre ces clusters de défaut unique, il peut être remarqué qu'il existe d'autres clusters composés cette fois de points ayant des couleurs chaudes (de jaune à rouge) représentant le couplage d'au moins deux défauts.

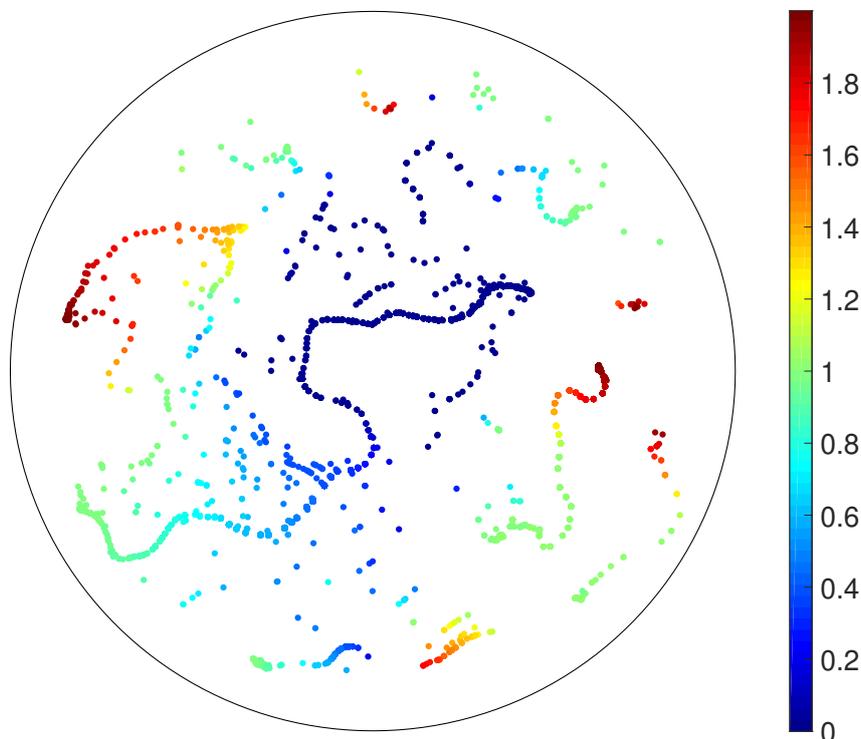


Figure 5.8 – Carte d'intensité des défauts d'hiver du cas de bâtiment existant.

L'étape suivante concerne la mise en évidence des défauts uniques. Les défauts n'ayant qu'une valeur de  $\sigma$  positive dans une seule dimension seront représentés. De cette manière les zones concernant réellement chaque défaut pourront être clairement identifiées. La carte résultant de ce

traitement est présentée en Figure 5.9

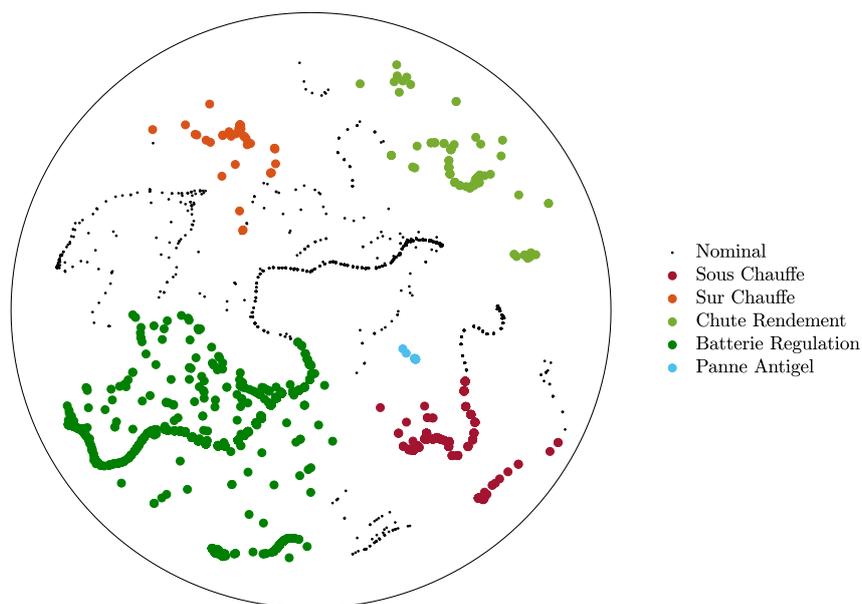


Figure 5.9 – Carte des défauts uniques d’hiver du cas de bâtiment existant.

L’analyse de cette carte permet de constater que les différents défauts ont bien été clusterisés. Ils sont tous relativement groupés. En effectuant une analyse avec la carte présentée en Figure 5.8, on constate que la zone centrale correspond bien à la zone de fonctionnement nominal. Celle-ci est clairement entourée des différentes zones de défauts. On constate également que des zones relativement étendues de points noirs (n’appartenant pas à des défauts uniques) se situent entre les différents clusters de défauts uniques. Cela confirme ce qui a été analysé précédemment (avec la Figure 5.8), il y a des zones de défauts couplés de surface importante entre les différents clusters de défauts. À ce stade l’outil permet de détecter et diagnostiquer les défauts uniques. Il est également possible de détecter l’apparition d’un défaut couplé dans les zones interstitielles. Néanmoins, aucune information sur les défauts couplés n’est fournie.

Le traitement suivant consiste en la mise en évidence des défauts couplés. Pour ce faire les points représentant des défauts couplés vont être colorisés de la couleur des défauts qu’ils comprennent. Le même formalisme que celui mis en place dans le Chapitre 4 est utilisé. Les défauts ne possèdent qu’une couleur et les défauts couplés plusieurs couleurs. La couleur centrale des défauts couplés est celle de son défaut principal (ayant le  $\sigma$  le plus élevé). Les couleurs des anneaux entourant le point représentent les autres défauts par ordre de grandeur de  $\sigma$  (plus l’anneau est proche du point plus il est important). En revanche, la carte est beaucoup plus dense et les clusters moins dissociés que les cartes présentées en Chapitre 4. C’est pourquoi, seules les couplages des deux premiers défauts seront présentés sur cette carte dans un souci évident de lisibilité. La Figure 5.10 fournit cette représentation.

L’analyse de cette figure permet un certain nombre de constats intéressants. On constate bien que seuls les points au centre du nuage de points sont restés noirs. Le fonctionnement nominal est donc bien groupé et central et ne s’immisce pas dans les zones *inter-défauts*. Cela induit bien évidemment que les zones *inter-défauts* uniques représentent donc les défauts couplés. De plus, ce couplage de défauts a bien lieu entre les défauts des clusters entourant cette zone de défauts couplés. Par exemple dans la zone *interstitielle* entre les défauts 5 et 2, les défauts multiples relèvent bien de couplage de ces deux défauts. Cela permet donc de mettre en évidence ces couplages de défauts de façon simple et compréhensible. Un dernier constat intéressant qui peut être mis en lumière grâce à cette carte concerne également les défauts multiples. Un autre avantage des

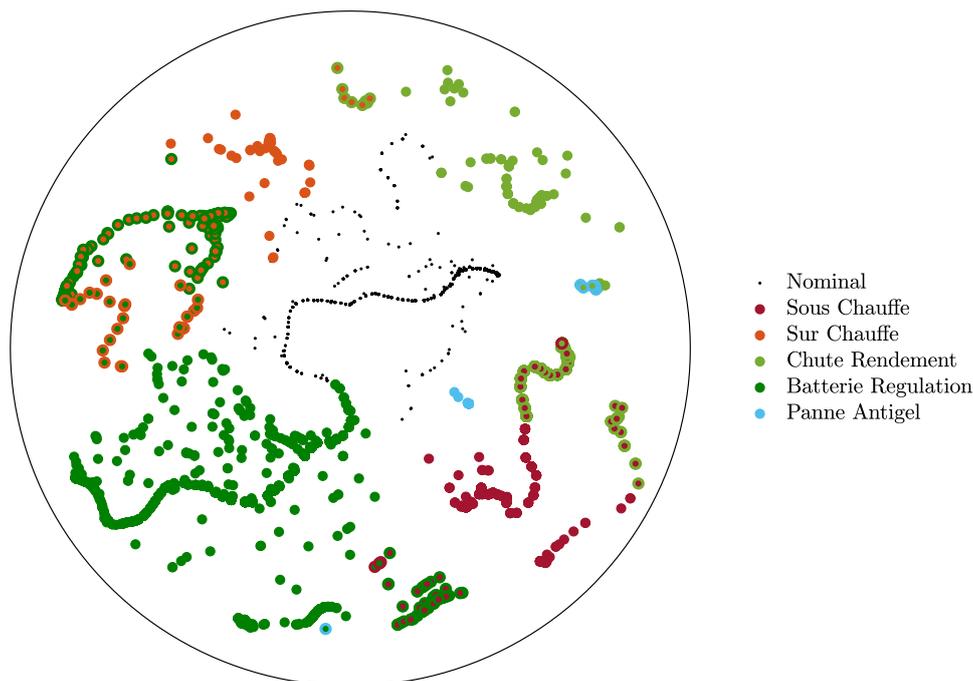


Figure 5.10 – Carte des défauts globaux d’hiver du cas de bâtiment existant.

représentations de ces méthode de réduction de dimension peut être mis en évidence avec cette carte. Grâce au fait que ces données (réelles) soient plus riches que les données numériques, les points couvrent beaucoup plus l’espace de représentation. Cela peut poser problème dans le cas de l’identification des clusters de défauts uniques mais cela permet également d’illustrer une capacité intéressante des méthodes de réduction. En analysant les espaces *inter-défauts* on constate qu’en plus de bien insérer les défauts couplés entre les défauts uniques correspondant, la méthode a également organisé l’espace *inter-défauts*. En effet, lorsque les données permettent de cribler suffisamment ces espaces il peut être remarqué que les défauts couplés sont toujours placés à proximité des zones de défauts uniques correspondant à leur défaut principal. Cela signifie que ces espace *inter-défauts* construits par la méthode permettent d’apprécier l’évolution du gradient d’évolution des  $\sigma$ . Ce phénomène est présenté avec dans la Figure 5.11.

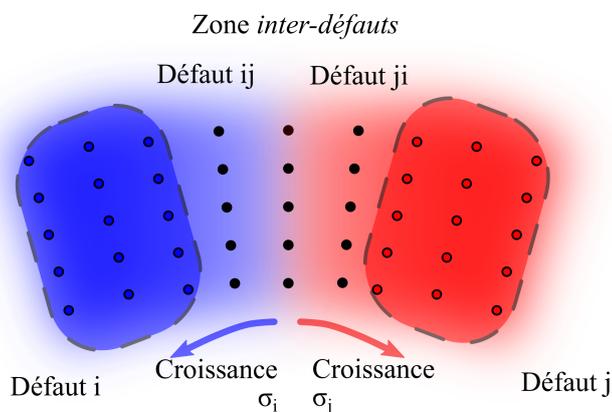


Figure 5.11 – Schéma de l’évolution des indices de sévérité dans les zones inter-défauts.

Les points les plus proches des zones de défauts uniques possèdent des valeurs  $\sigma$  de ce défaut plus importantes. Plus les points s’écartent des zones de défauts uniques plus la valeurs de l’indice

de sévérité de ce défaut diminue et celle du défaut vers lequel le point se dirige augmente.

### 5.4.2.2 Les cartes estivales

Les mêmes étapes ont été réalisées pour la saison d'été. Ces cartes ont été réalisées à partir des données historiques du bâtiment durant la période estivale. La première carte directement issue de la réduction des données pré-traitées en phase ingénierie amont est présentée en Figure 5.12. Comme pour le cas d'hiver, on constate que les points sur la carte générée sont relativement dispersés. Les clusters ne sont pas facilement identifiables. On constate néanmoins deux principales zones, une très importante à droite et une plus petite à gauche.



Figure 5.12 – Carte initiale d'été du cas sur bâtiment existant obtenue par la méthode de réduction de dimension.

La seconde carte générée, fournissant les indices totaux de sévérité, est présentée en Figure 5.13. En analysant cette carte, on constate que le fonctionnement nominal du système ne se situe pas au centre. Cela peut être induit du fait qu'il y ait un faible nombre de défauts à mettre en évidence. En effet seuls trois défauts sont pris en compte, la moitié de ce qui était étudié dans les autres. Avec ce nombre plus restreint de défauts l'espace de fonctionnement nominal a accès aux autres clusters sans avoir besoin de se situer au centre du nuage de points. En revanche, bien que l'aspect de la carte semble différent du fait de ce fonctionnement nominal excentré, les observations faites sur la répartition des clusters et de leur séparation reste vrai. Sur cette carte on peut identifier trois zones distinctes ne comportant qu'un seul défaut. Tout d'abord, chacune de ces zones de défauts est accessible depuis l'espace alloué au fonctionnement nominal. Ensuite ces différents clusters de défauts uniques sont séparés entre eux par des zones de défauts couplés (comme pour le cas hiver. Pour finir, on constate qu'il y a l'existence d'une zone de défauts couplés qui se trouve entre les trois zones de défauts uniques. Encore une fois cette carte permet la détection de défauts, mais pas encore leur identification, c'est pourquoi elle nécessite encore des traitements.

La carte suivante permet de visualiser les défauts uniques et de les identifier. Cette carte est présentée en Figure 5.14. On constate que l'hypothèse formulée précédemment sur l'emplacement des clusters de défauts uniques se confirme. Les trois zones de défauts uniques qui se trouvaient sé-

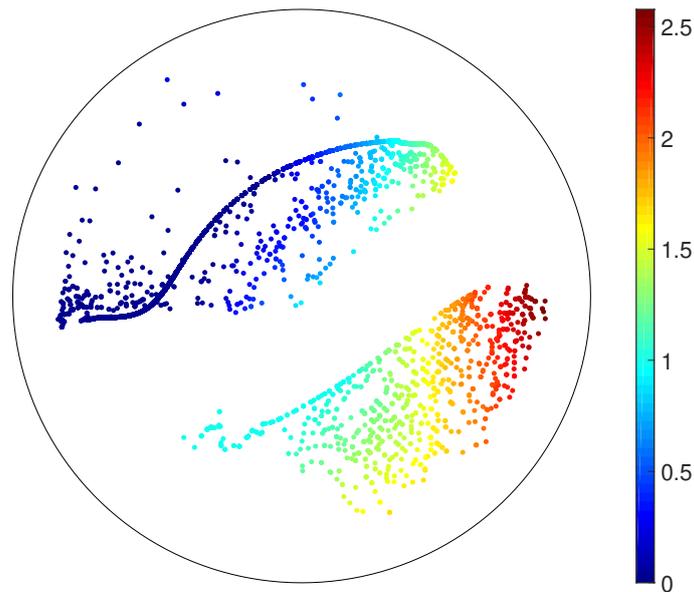


Figure 5.13 – Carte d'intensité des défauts d'été du cas de bâtiment existant.

parées par les emplacements des défauts couplés sont bien les clusters des trois différents défauts. Dans cette représentation, même si le nombre de défaut est inférieur aux cartes étudiées jusqu'à présent, les clusters sont bien identifiés. Ces clusters sont également isolés les uns des autres par des zones de défauts couplés, comme cela avait pu être confirmé dans les cartes du fonctionnement hivernal.

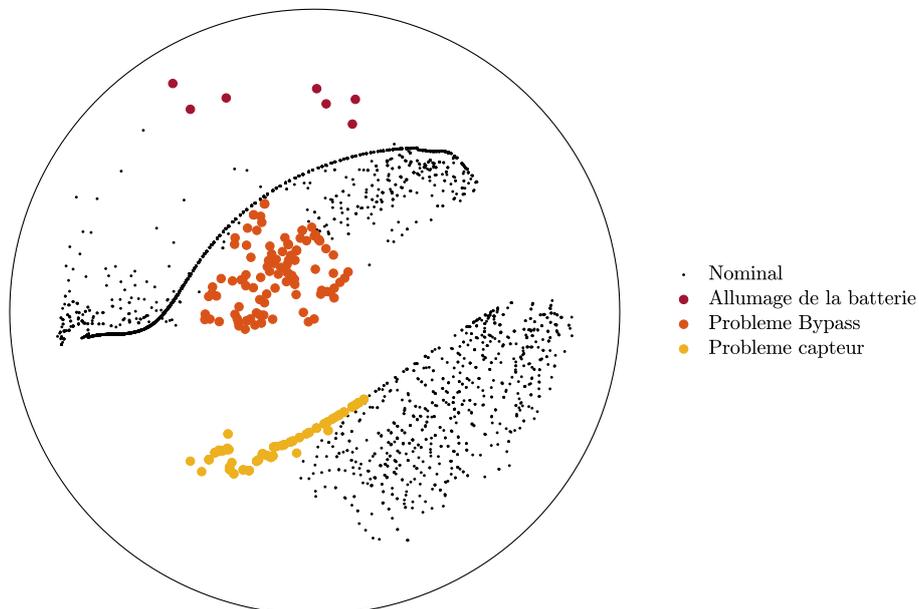


Figure 5.14 – Carte des défauts uniques d'été du cas de bâtiment existant.

Avec ce type de carte la détection de défauts et du diagnostic peuvent être réalisés. En revanche, les défauts couplés ne peuvent pas être diagnostiqués. Un traitement servant à les mettre en évidence pour permettre leur identification est donc encore nécessaire.

Le dernier traitement concerne la mise en évidence des défauts couplés. Cette carte est présentée en Figure 5.15. Sur cette carte les couplages de binôme mais également de trinôme de défauts

sont représentés. La carte comportant moins de défauts que celle présentée en Figure 5.10 sur le cas hiver, les défauts triples peuvent être appréciés sans problèmes.

En analysant cette carte, il est constaté que les défauts couplés sont désormais visibles et se situent bien aux localisations espérées. Le placement des *défauts couplés doubles* (union de deux défauts) entre les zones des défauts uniques apparaissant simultanément est encore respecté. Dans le cas des *défauts triples* (couplage entre trois défauts), les points sont situés entre les trois zones de défauts uniques et les quatre zones de défauts doubles. Les défauts triples sont situées au centre de l'espace de l'ensemble des défauts couplées (car cette zone est accessible depuis tous les défauts doubles).

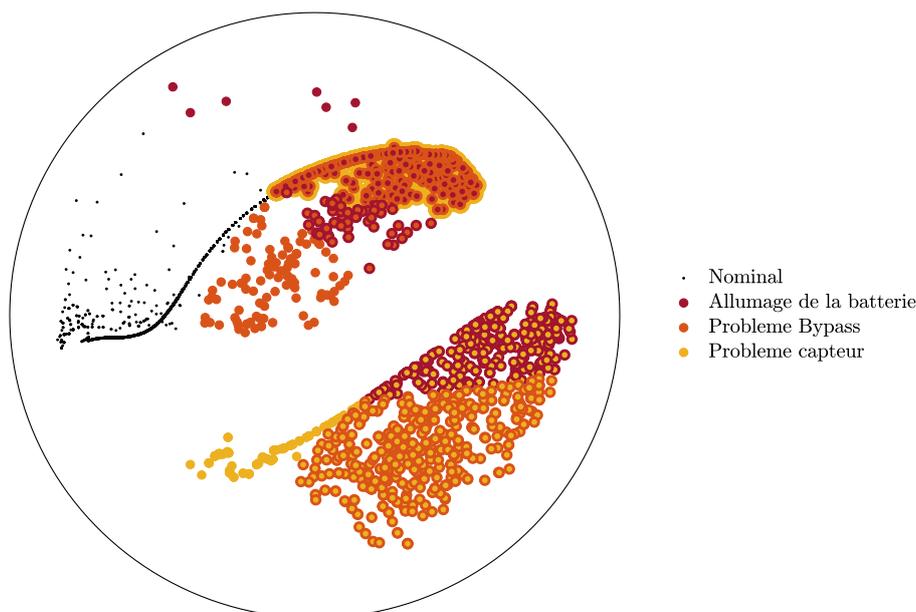


Figure 5.15 – Carte des défauts globaux d'été du cas de bâtiment existant.

### 5.4.3 Cartes finales à destination des équipes techniques

Dans cette section des exemples de cartes complètement traitées sont données. Ces cartes sont celles qui pourraient être fournies aux équipes de pilotage et d'exploitation ou aux services techniques.

#### 5.4.3.1 La carte pour la saison d'hiver

La carte finale correspond à celle qui sera affichée sur le système de suivi. Cette dernière doit être le plus simple possible comme elle est à destination des utilisateurs. La Figure 5.16 fournit l'une des représentations de ce type de carte possible. Pour rendre cette carte encore plus compréhensible des zones ont été attribuées aux différents clusters. Chacune de ces zones a été teintée de la couleur du défaut auquel elles renvoient. Ainsi, dès lors qu'un fonctionnement du système apparaît dans l'une des zones ajoutées, il peut être considéré comme relevant du défaut de la couleur. Les zones de défauts couplés ont été colorisées par les deux couleurs des défauts apparaissant simultanément. C'est également dans cette étape qu'est ajouté le cercle entourant le nuage de points.

#### 5.4.3.2 La carte pour la saison d'été

La dernière carte à présenter est la carte concernant la saison estivale à destination des équipes techniques. Cette dernière est présentée en Figure 5.17. Elle a subi les mêmes traitements que

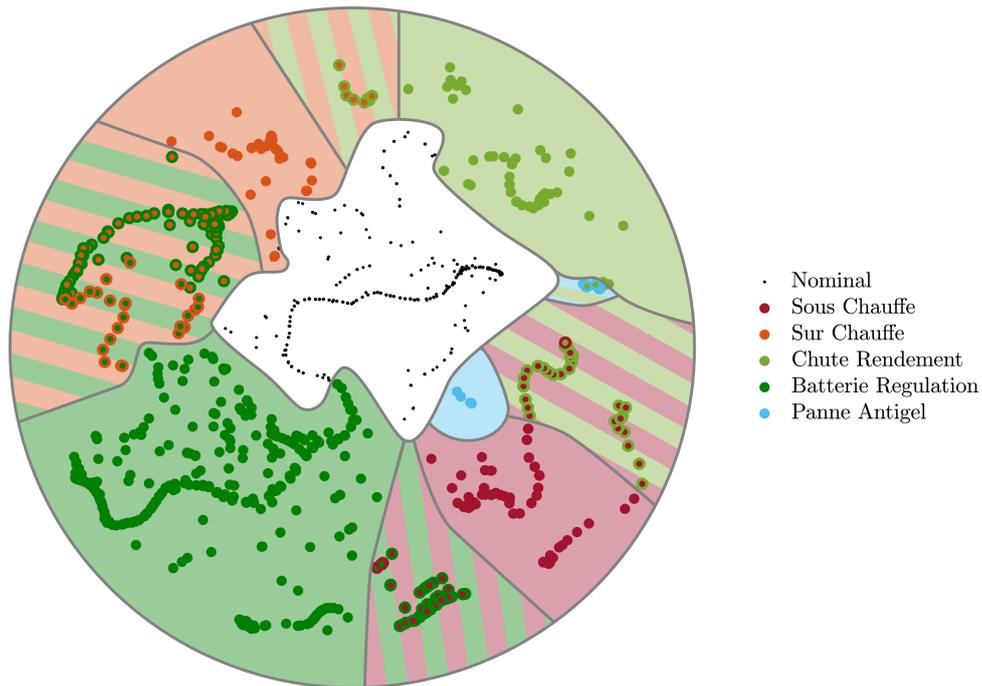


Figure 5.16 – Carte finale de la saison d'hiver du cas de bâtiment existant.

celles qui viennent d'être présentées pour la carte de la saison d'hiver. La seule différence réside dans le fait que pour les défauts couplés triples, la zone teintée ajoutée est composée de trois couleurs. Les trois couleurs relatives aux trois défauts apparaissant.

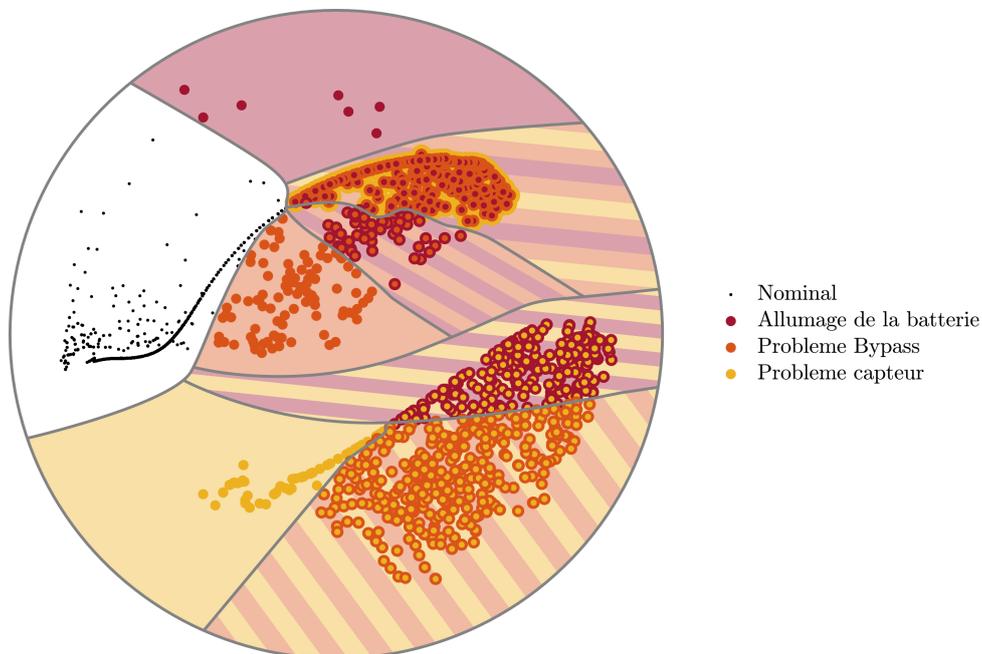


Figure 5.17 – Carte finale de la saison d'été du cas de bâtiment existant.

Avec ces nouvelles cartes on constate de nouveau que les représentations permettent d'apprécier de façon claire des zones relatives à chacun des défauts. Les cartes fournissent une représentation de l'état de fonctionnement du système avec une bonne lisibilité, même pour les cas comportant plusieurs couplages. Grâce à ce nouveau cas d'étude il a pu être mis en évidence qu'une organisa-

tion existait également dans les zones de défauts couplés (*i.e.* les zones *inter-défaut unique*). Cet arrangement dans les zones inter-défauts permet d'apprécier l'évolution du poids de l'indicateur de sévérité (SI) des deux défauts. Les points dans une zone inter-défauts, les plus proches d'une zone de défaut unique sont ceux pour lesquels ce défaut est majoritaire. Plus les points se déplacent vers le centre de la zone de défauts couplés plus les valeurs des SI se valent. Ce constat peut être apprécié en analysant la zone des défauts couplés de *Surchauffe* et de *Problème de régulation de la batterie* des Figures 5.8 et 5.10. Dans cette zone située sur la gauche du nuage de points, on constate que les points de défauts couplés ayant un indice de sévérité élevé pour un défaut sont placés près de ce défaut. Cela correspond au fait que les points proches d'un défaut unique (donc pour lequel ce défaut est principal) possèdent leurs points centraux de la même couleur que ce défaut unique. De plus en analysant la Figure 5.8 on constate qu'il y a bien une évolution de la valeur des indices de sévérité des frontières de la zone de défauts couplés à son centre. L'endroit où la somme de ces indicateurs de sévérité est le plus élevé se trouve bien au passage des défauts couplés avec une composante principale à une autre (lorsque la couleur centrale des points change). Cette situation illustre bien que les gradients des indices de sévérité déjà appréciables dans les zones de défauts uniques, sont également représentés au sein des zones de défauts couplés.

En revanche, bien que la lisibilité des cartes présentant peu de défauts (par exemple la Figure 5.15) ne soit pas mauvaise, ces dernières semblent moins abouties. La majorité des constats effectués au préalable reste vraie sur ces cartes, à l'exception de la centralité de la zone nominale. Néanmoins, l'intégralité des zones de défauts uniques reste directement accessible depuis la zone de fonctionnement nominale. Il peut également être constaté que lorsque le nombre de couplages augmente, la méthode peine à fournir une représentation claire et efficace (selon nos critères d'appréciation). Encore une fois cela peut être apprécié sur la carte fournie par la Figure 5.15. Dans cette représentation on constate que les zones de défauts simples sont bien clusterisées. Les zones dont le défaut dit principal est identique sont également regroupées (*e.g.* tous les points ayant comme couleur centrale le jaune pour le défaut de problème de capteur, sont bien regroupés en bas de la carte). On constate en revanche que certaines zones de défauts couplés n'ont pas d'accès direct à la zone de fonctionnement nominale. Cela peut être dû à plusieurs raisons, comme par exemple le fait qu'il n'y a pas beaucoup de défauts et que le fonctionnement nominal ne se situe pas au centre du nuage de points, mais cela peut également venir des données elles mêmes. En effet comme le montre la Figure 5.18 présentant la variation de deux indices de sévérité, cela peut être induit par les données elles mêmes. Si, une majorité des points de fonctionnement de défauts couplés n'apparaissent pas à la suite d'un fonctionnement nominal mais d'un défaut unique, alors il est probable que la méthode de réduction ne représente pas ces zones de façon contiguë.

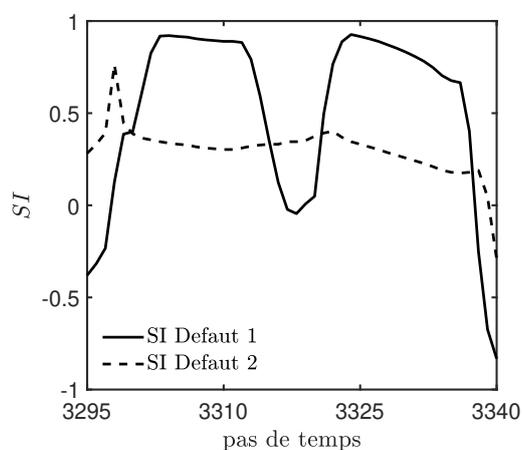


Figure 5.18 – Évolution des indices de sévérité des défauts n°1 et 2.

## 5.5 La validation

Grâce à la première partie de ce chapitre, les cartes saisonnières du bâtiment étudié ont pu être réalisées. Dans cette seconde partie, il va être testé le fait que ces cartes peuvent être utilisées d'une année sur l'autre et qu'elles permettent toujours de bien mettre en évidence l'apparition de nouveaux défauts. Pour ce faire, il va être utilisé les données du même bâtiment mais ayant été enregistrées l'année suivante à celles utilisées pour la création de la carte. De la même façon que dans le Chapitre 4, ces données vont être traitées dans un premier temps puis projetées sur les cartes existantes. Ainsi la validité de ces cartes sur une autre année pourra être appréciée.

### 5.5.1 Les donnée

Dans le cadre de cette seconde étape de validation, les données qui ont été utilisées proviennent de l'année 2014. Elles sont identiques à celles de l'année précédente en terme de grandeur physique, de localisation et de fréquence d'enregistrement. Pour rappel la probabilité de densité des températures intérieures et extérieures relevées est présentée dans la Figure 5.5(b).

Les données relatives à cette seconde année de fonctionnement vont subir les mêmes traitements que celles de l'année initiale. Elles vont passer premièrement par la phase de *pré-traitement*. Ces données seront traitées par les mêmes règles mais dont les valeurs des paramètres  $U_{ij}$ ,  $U_{\infty}$  et  $\beta$  peuvent avoir été modifiées pour être plus représentatives du fonctionnement du bâtiment sur cette seconde année. La Figure 5.19 donne l'évolution de la température intérieure et de soufflage sur une période identique à un an d'intervalle. Cet exemple permet de montrer que sur cette période la température de consigne intérieure a été largement élevée la seconde année passant d'environ  $19^{\circ}\text{C}$  à  $20^{\circ}\text{C}$ .

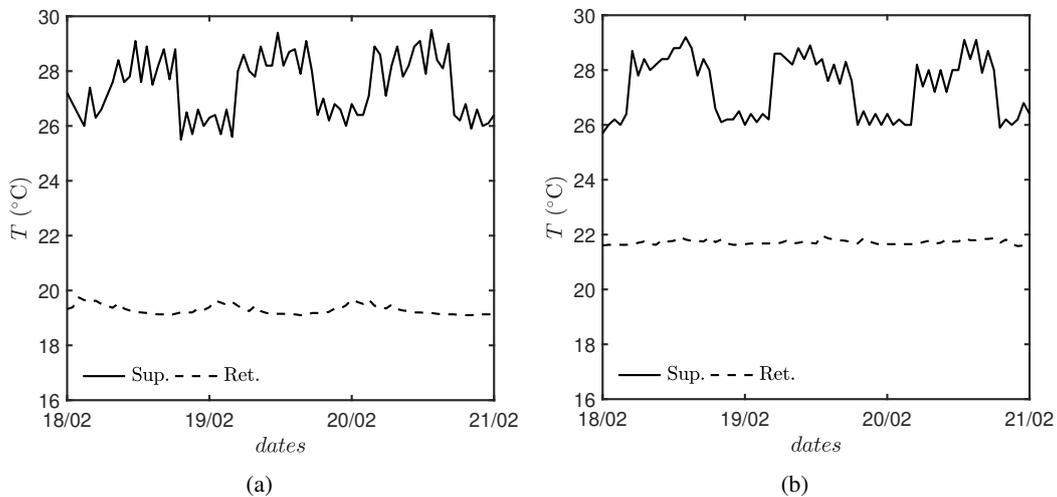


Figure 5.19 – Évolution des températures intérieure et de soufflage (a) lors de la première et (b) seconde année.

L'intégralité des données de l'année est donc premièrement modifiée par les différentes règles expertes afin de pouvoir exprimer l'apparition du défaut.

### 5.5.2 Projections

Une fois l'étape préalable de traitement effectuée, les données mesurées initialement sont exprimées par leur indices de sévérité à chaque pas de temps. Chacune de ces données peut alors être réduite grâce à la méthode RBF d'après les coordonnées d'origine et réduite des données utilisées

pour l'élaboration de la carte. Les nouvelles coordonnées obtenues servent à projeter chaque nouveau point sur les cartes déjà établies de l'année précédente. Cette étape correspond à la phase en temps réel d'utilisation de l'outil.

Dans cette Section une carte sera présentée pour montrer la projection de chacun des défauts. Un total de cinq cartes sera donc fourni pour la saison d'hiver et trois pour celle d'été. Sur chacune de ces cartes cinq défauts avérés seront projetés afin de permettre l'estimation de la qualité de la détection visuelle du défaut, sans toutefois surcharger inutilement les cartes.

### 5.5.2.1 La saison hivernale

#### *Le défaut de sous chauffe.*

La premier défaut de la saison d'hiver correspond au défaut appelé de *sous chauffe*. Néanmoins, ce défaut semble avoir été résolu par le personnel en charge du pilotage et de l'exploitation du bâtiment. Les indices de sévérité de ce défaut sont quasiment constamment à  $-1$ , avec une valeur maximale s'élevant de  $65e^{-12}$ . La Figure 5.5(b) qui présente la distribution des températures de cette année, pouvait le laisser entrevoir. En effet, la distribution des températures intérieures de cette année ne descend pratiquement pas au dessous de  $20^{\circ}\text{C}$  contrairement à celles de l'année précédente.

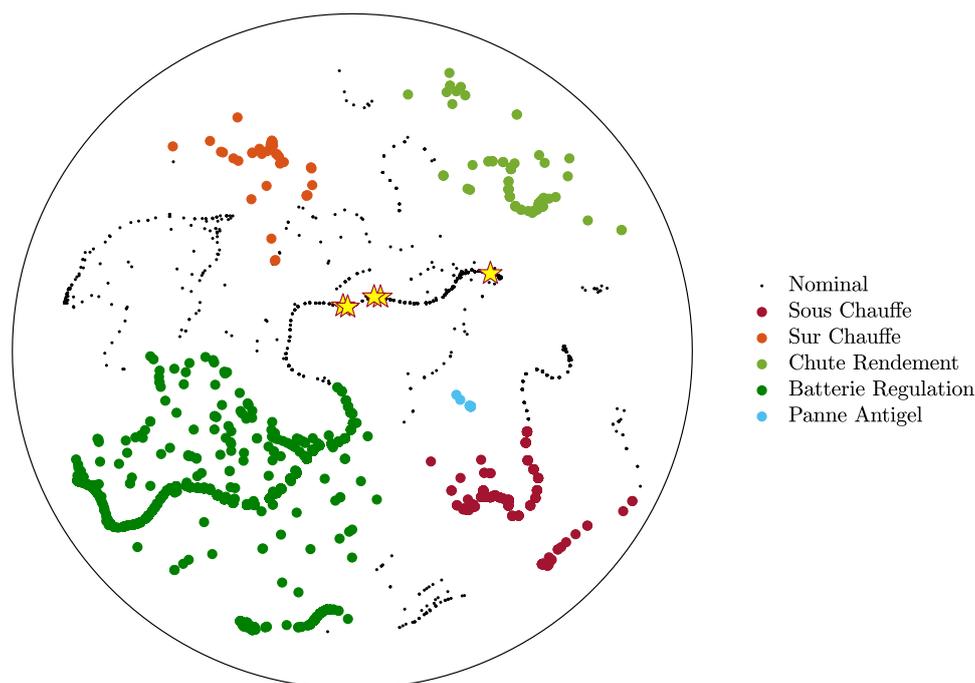


Figure 5.20 – Projection de défaut de sous chauffe.

La Figure 5.20 présente la projection de cinq points de fonctionnement ayant une valeur de l'indice de sévérité (SI) différente de  $-1$ . On constate donc qu'aucun de ces points ne quitte la zone de fonctionnement nominal. Le déplacement de ces points dans l'espace de fonctionnement nominal est surtout dû aux variations des valeurs des SI des autres défauts.

#### *Le défaut de surchauffe.*

Le second défaut identifié, nommé de *surchauffe* est en revanche encore présent durant cette seconde année de fonctionnement du système. L'évolution de l'indicateur de sévérité des points

projetés sur la carte est présentée en Figure 5.21. Seuls les points à partir de  $t = 0$  sont projetés sur la carte afin de pouvoir apprécier l'apparition du défaut. On constate que sur ces cinq derniers points la valeur du SI augmente significativement. Cela induit que le défaut apparait durant cette période.

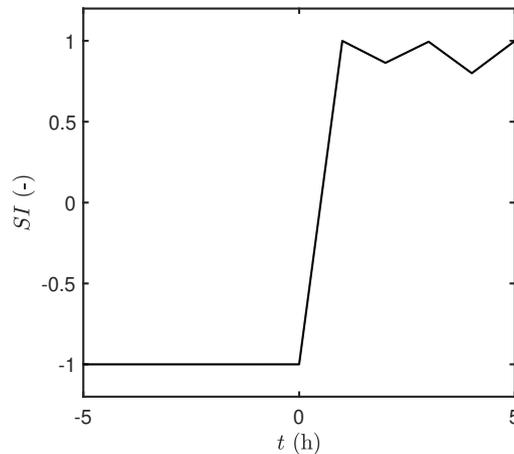


Figure 5.21 – Indicateur de sévérité du défaut de sur-chauffe.

La Figure 5.22 fournit l'évolution des points de fonctionnement du système à partir de  $t = 0$ . Le point correspondant à  $t = 0$  se situe dans la zone de fonctionnement nominal du système. Ceci est normal car l'indice de sévérité est inférieur à 0. Les points suivants, regroupés sous l'appellation  $t > 0$  se situent tous dans la zone allouée au défaut de surchauffe. En effet, ces points de fonctionnement possèdent tous une valeur supérieure à zéro pour l'indice de sévérité de ce défaut.

#### *Le défaut de chute du rendement de l'échangeur*

L'évolution de l'indice de sévérité du défaut qui concerne la chute de rendement de l'échangeur à plaque du système de ventilation est présentée dans la Figure 5.23. Il peut être remarqué une fois encore qu'avant  $t = 0$  annonçant l'apparition du défaut, le SI est négatif. À partir de cette impulsion à  $t = 0$ , le SI augmente de façon continue jusqu'au cinquième pas de temps.

La Figure 5.24 présente la projection de ces points sur la carte de l'année précédente. Le premier point projeté, correspondant à  $t = 0$  se situe bien dans la zone de fonctionnement nominal. Le second point, possédant une valeur de SI légèrement supérieure à 0, se situe juste à la frontière des points utilisés pour déterminer la zone de ce défaut. Ce point est bien défaillant, malgré le fait qu'il ne se situe pas exactement sur la zone strictement définie par les points existants. Ceci indique que la carte préalablement établie ne comportait pas de points avec une valeur d'indice de sévérité aussi faible pour ce défaut.

#### *Le défaut de problème de régulation de la batterie.*

Concernant le défaut de problème de régulation de la batterie, l'évolution des valeurs de son SI peut être observée sur la Figure 5.25. On peut remarquer une légère variation des valeurs de l'indice de sévérité avant  $t = 0$ , mais restant toujours inférieure à zéro. Puis, après  $t = 0$ , la valeur des SI devient positive et le reste, bien que sa valeur varie.

En ce qui concerne la projection de ces données, cette dernière est présentée en Figure 5.26. Le point projeté qui possède une valeur d'indice de sévérité du défaut de régulation de la batte-

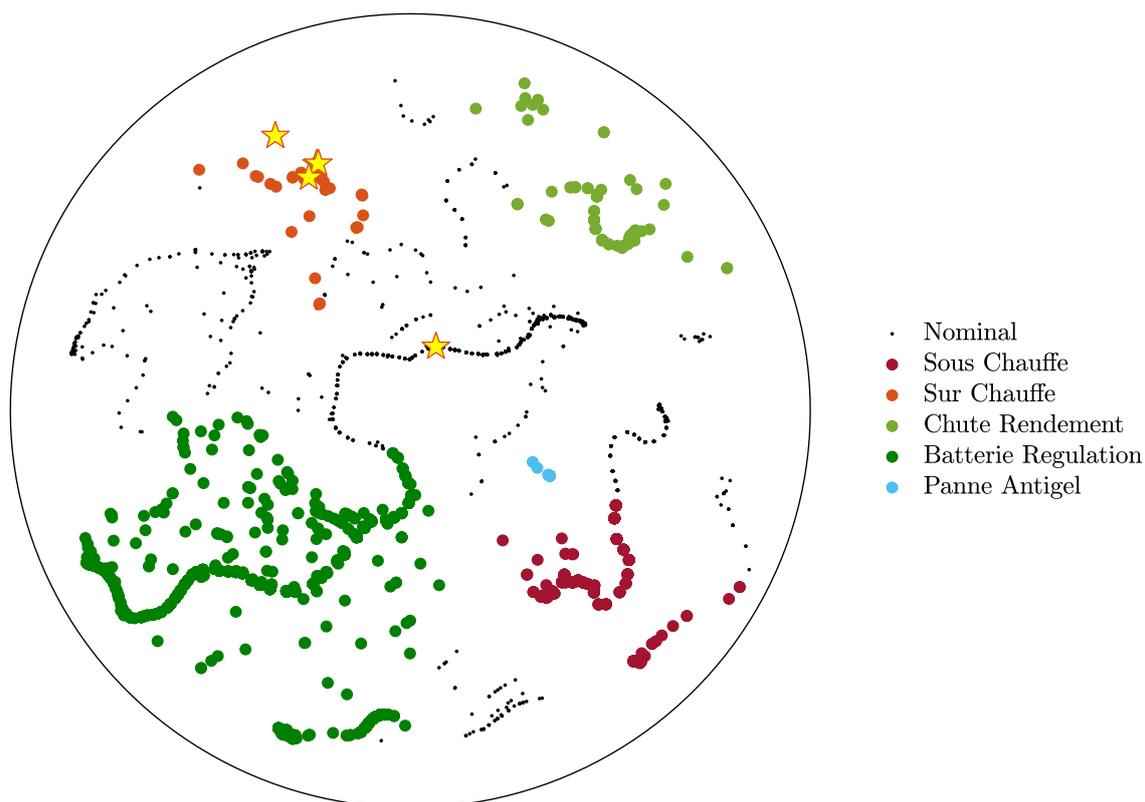


Figure 5.22 – Projection de défaut de sur-chauffe.

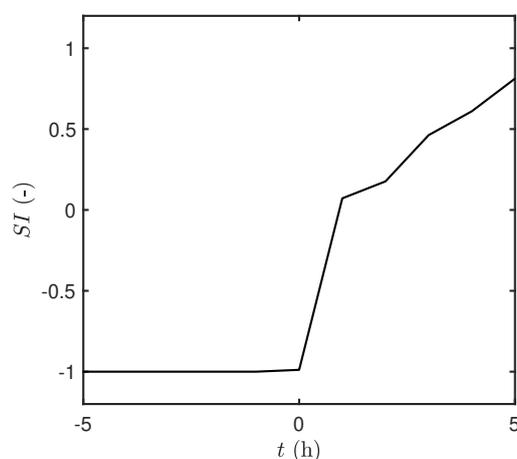


Figure 5.23 – Indicateur de sévérité du défaut de chute de rendement.

rie négative est localisé au centre du nuage de points, dans la zone de fonctionnement nominal. Puis les autres points sont ensuite placés dans l'espace de défaut unique réservé à ce problème. En analysant cette projection, au regard de la carte présentée en Figure 5.8 et des valeurs des indices de sévérité de ces points on remarque qu'ils sont correctement placés. En effet, d'après la Figure 5.25, les valeurs des SI projetées correspondent approximativement à 0.60, 0.75 et 1.00. Les localisations sur lesquelles ces points ont été projetés correspondent bien aux emplacements correspondant à ces valeurs d'indice de sévérité, présentées sur la Figure 5.8.

*Le défaut de panne de la batterie antigel.*

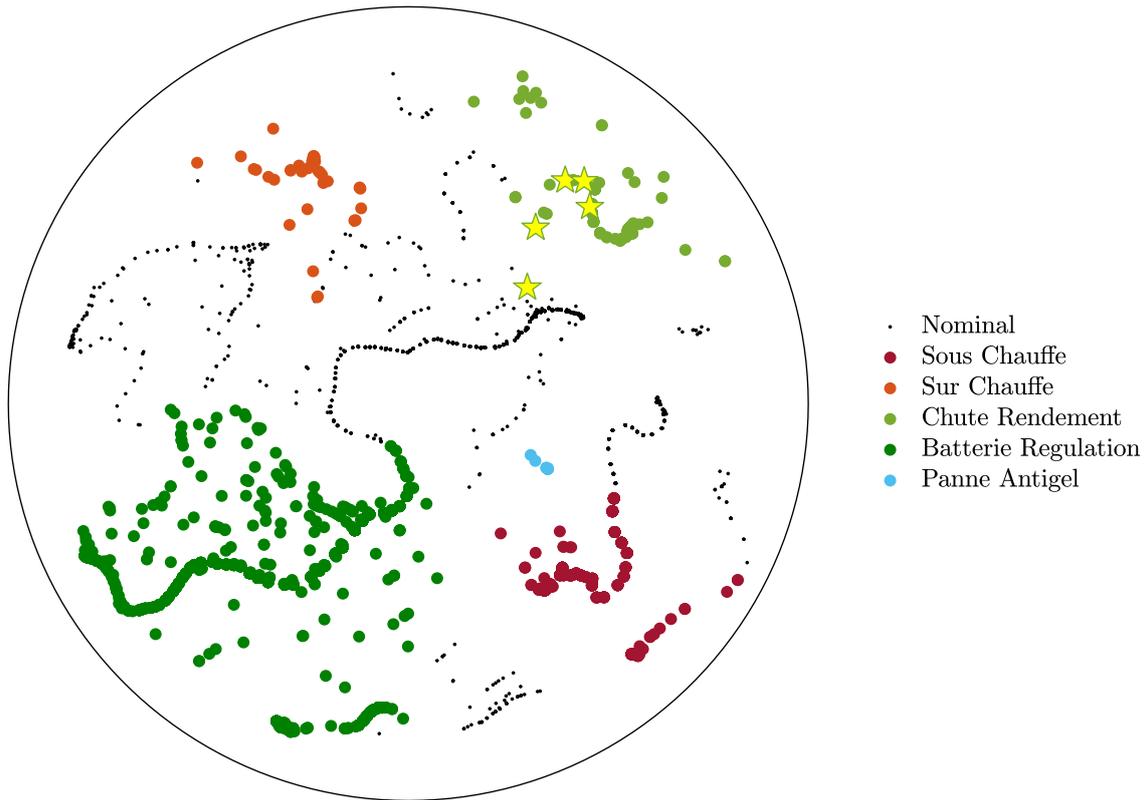


Figure 5.24 – Projection de défaut de chute du rendement de l'échangeur.

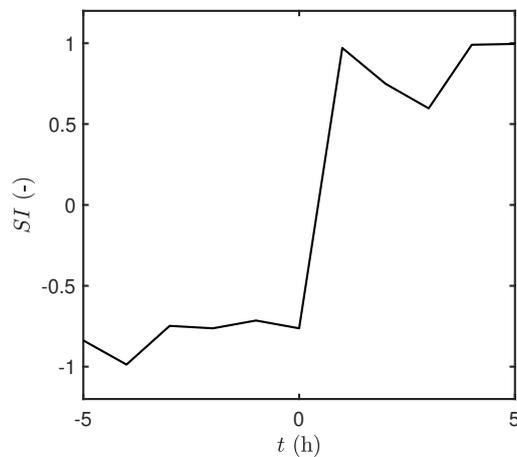


Figure 5.25 – Indicateur de sévérité du défaut de chute de rendement.

Le dernier défaut présent sur ces cartes correspond au défaut de la panne de la batterie antigél. Les indices de sévérité de ce défaut correspondant aux points de fonctionnement qui seront projetés sont présentés dans la Figure 5.27. Comme dans le cas des autres projections seuls les points à partir de  $t = 0$  seront projetés afin de ne pas surcharger la carte. Il peut être mis en évidence que durant cette évolution, les SI sont constamment égaux à  $-1$  avant  $t = 0$  et valent quasiment toujours 1 après.

La Figure 5.28 présente la projection de ces points de fonctionnement. Le point de fonctionnement avec une valeur de  $-1$  est au centre de la zone de fonctionnement nominal. Le reste des points, ayant une valeur quasi identique, se superpose tous dans l'espace correspondant au défaut

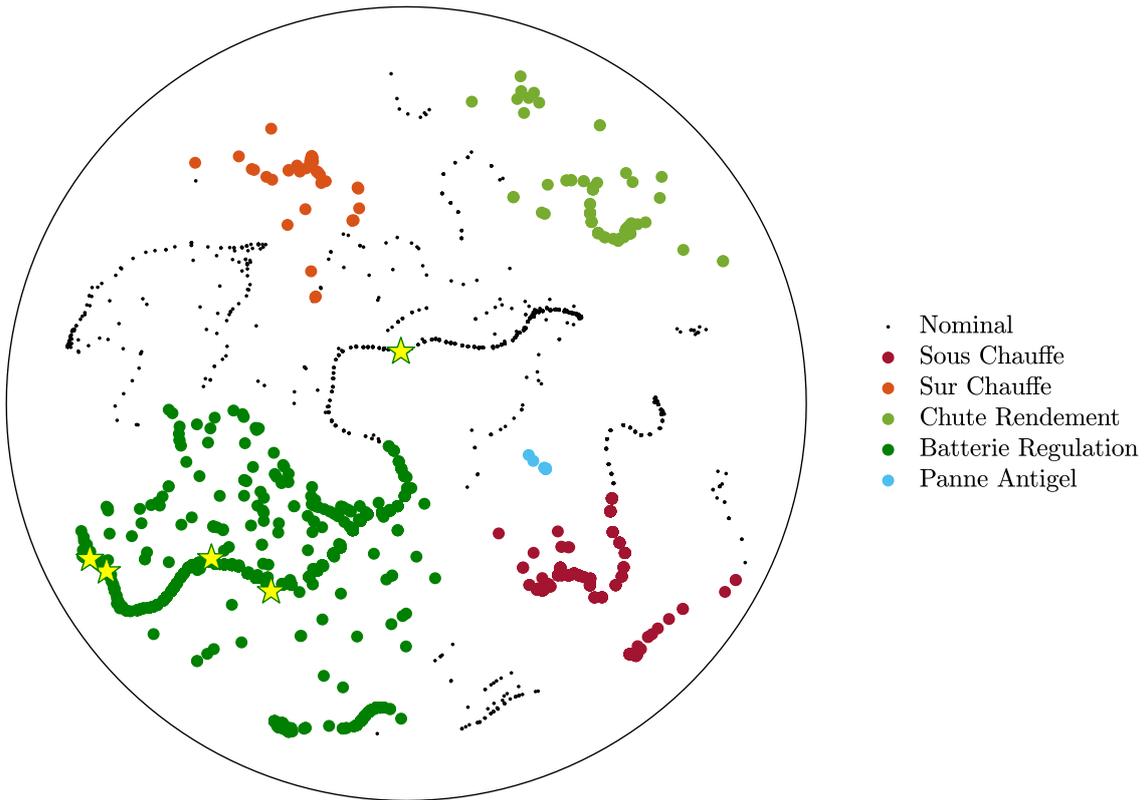


Figure 5.26 – Projection de défaut de chute du rendement de l'échangeur.

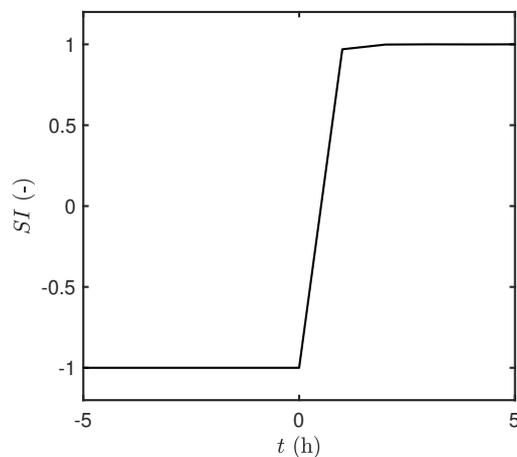


Figure 5.27 – Indicateur de sévérité du défaut de panne de la batterie antigel.

unique de la panne de la batterie antigel.

#### Les défauts couplés.

Pour illustrer l'efficacité de la méthode sur les défauts couplés il va seulement être utilisé le cas du couplage entre les défauts de sur-chauffe et de problème de régulation de la batterie. Les indices de sévérité de ces deux défauts, appelés respectivement défaut 2 et défaut 4 sont présentés dans la Figure 5.29. Ainsi sur cette figure il peut être observé qu'avant  $t = 0$  les SI de ces deux défauts sont négatifs. À partir de l'apparition de ce défaut couplé, les valeurs deviennent positives et le restent. Il peut être constaté que jusqu'à  $t = 4$  le défaut de la batterie ( $n^{\circ}4$ ) est majoritaire, puis cela s'inverse.

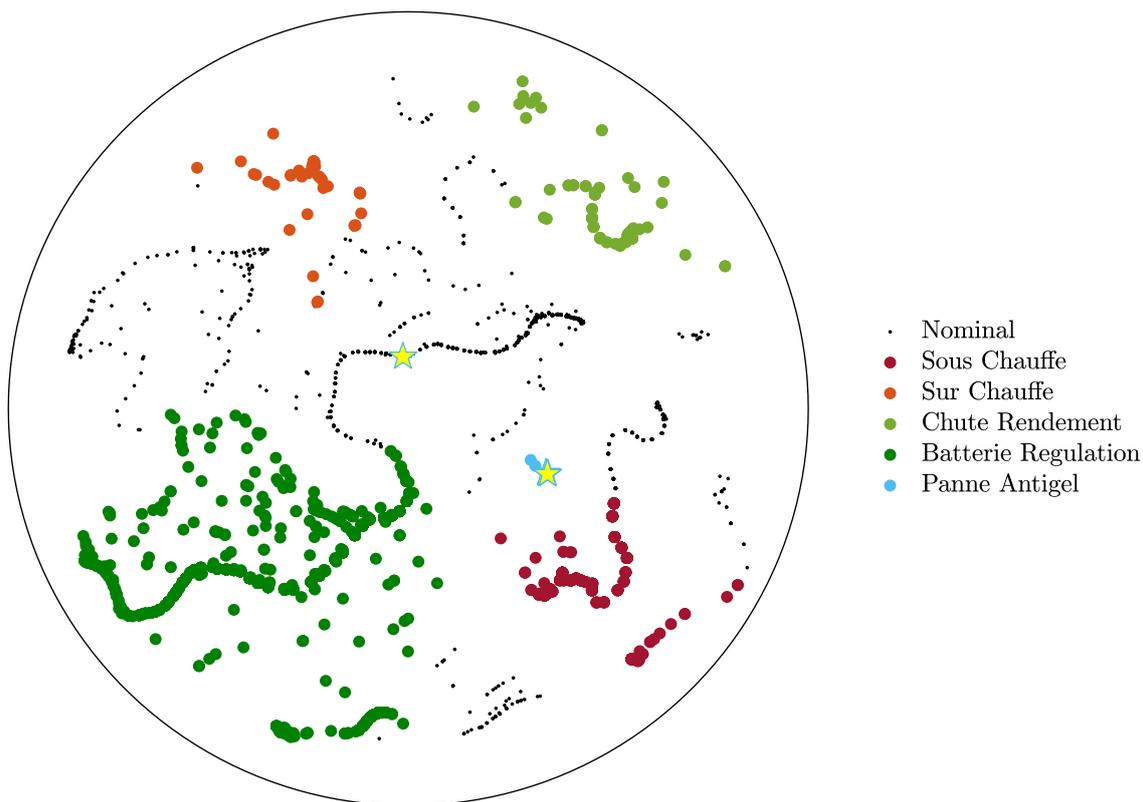


Figure 5.28 – Projection de défaut de panne de la batterie antigel.

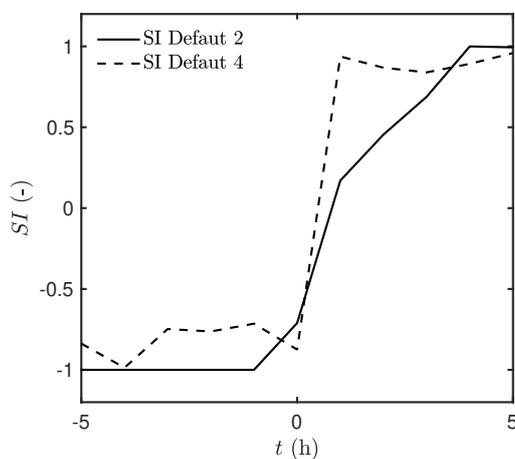


Figure 5.29 – Indicateurs de sévérité des défaut de sur chauffe (2) et de la batterie (4).

La Figure 5.30 fournit la projection de ces données sur la carte existante. Le point à  $t = 0$  se situe dans la zone de fonctionnement nominal. Tout d’abord, concernant le reste des données, elles sont correctement projetées dans la zone correspondant au couplage de ces deux défauts. Ensuite, il y a bien trois données qui se trouvent dans la zone où le défaut  $n^{\circ}4$  est majoritaire, ce qui correspond bien aux résultats des indices de sévérité. Parmi ces trois points, deux se trouvent très proches de la zone de défaut unique de la batterie de régulation. Ils correspondent aux deux premiers points qui possèdent des valeurs de SI pour le défaut  $n^{\circ}4$  bien supérieures à celui du défaut  $n^{\circ}2$ . Le troisième se situe relativement au centre de la zone de défaut couplé, ce qui indique que les indices de sévérité des deux défauts sont proches (avec toujours le défaut  $n^{\circ}4$  majoritaire).

De plus ce point ne possède pas des valeurs de SI trop élevées car il ne se situe pas dans la bordure extérieure de cette zone. Ce point de fonctionnement correspond à celui présenté à  $t = 3$  possédant des valeurs de SI d'environ 0.70 pour le défaut  $n^{\circ}2$  et 0.80 pour le  $n^{\circ}4$ . Les deux derniers points, où le défaut  $n^{\circ}2$  est majoritaire correspondent logiquement aux points à  $t = 4$  et  $t = 5$ . Le point le plus central des deux zones et le plus en bordure extérieure du nuage de points est le point de  $t = 5$ , il possède bien les valeurs des deux SI très proches et très élevées.

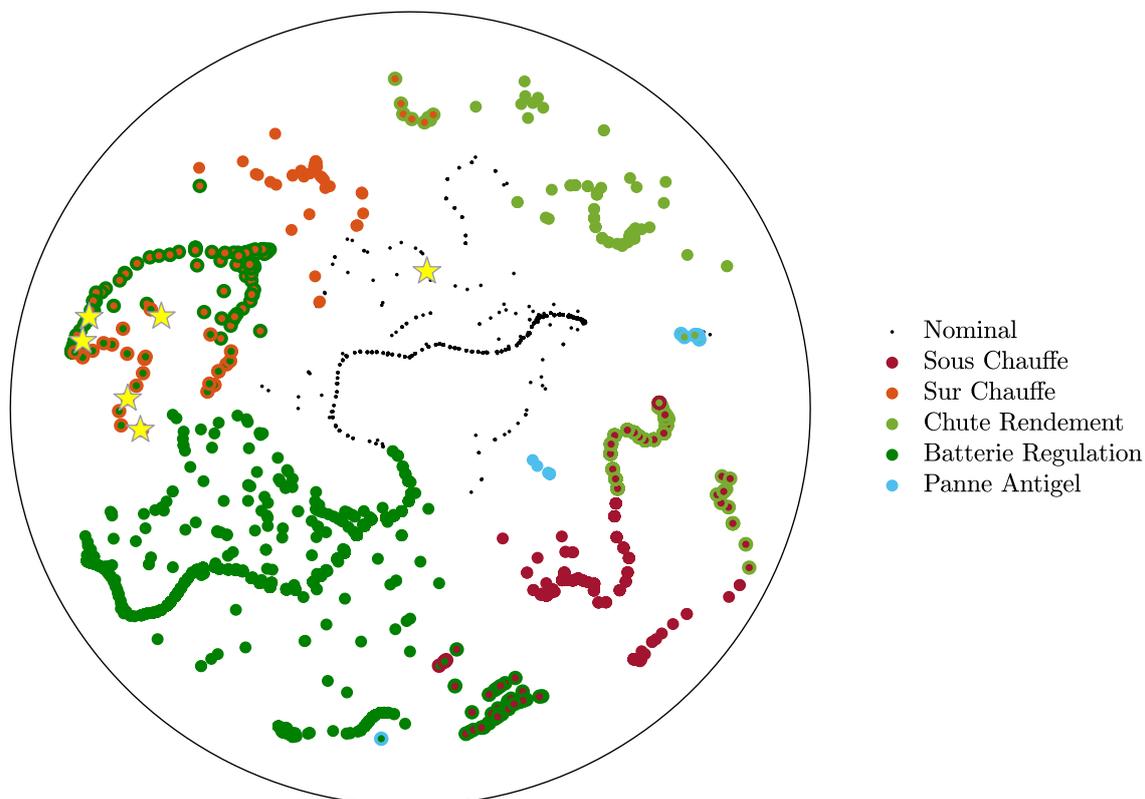


Figure 5.30 – Projection des défauts couplés de sur chauffe et de batterie.

### 5.5.2.2 La saison estivale

*Le défaut d'allumage de la batterie.*

Le premier défaut de la saison estivale correspond à l'allumage de la batterie lors de situation ne le nécessitant pas. Les valeurs des indices de sévérité des points projetés sont présentées dans la Figure 5.31. Le défaut apparaît à  $t = 0$  puis se maintient. La valeur de l'indice de sévérité est faible mais bien positive. Il peut être noté que les services de maintenance et pilotage ont dû agir sur ce défaut. En effet après analyse des données, celui-ci est bien moins présent que durant la première année et apparaît avec des valeurs de SI faibles.

La Figure 5.32 présente la carte de fonctionnement été sur laquelle les données ont été projetées. Le point à  $t = 0$  est bien localisé dans la zone de fonctionnement nominal. Les autres points sont projetés dans la zone du défaut approprié. Ils se trouvent en revanche plus près de la zone de fonctionnement nominal que les points du fond carte car ils possèdent des valeurs de SI inférieures à ceux de l'année précédente.

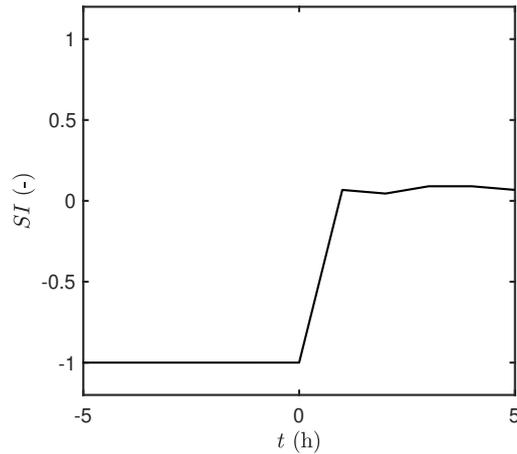


Figure 5.31 – Indicateurs de sévérité du défaut d’allumage de la batterie.

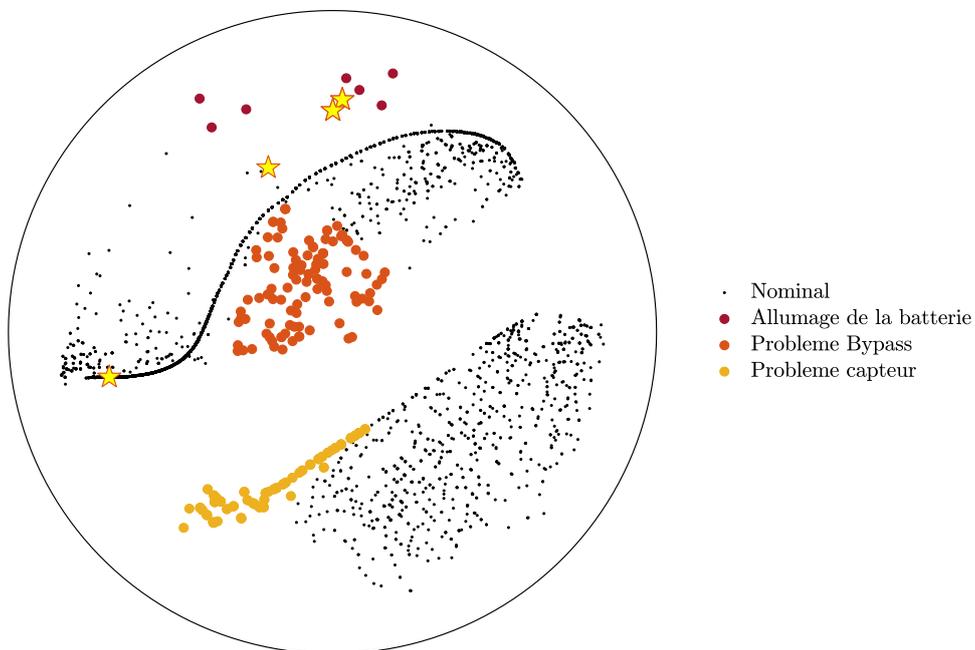


Figure 5.32 – Projection du défaut d’allumage de la batterie.

*Le défaut de problème du bypass.*

L’évolution des indices de sévérité du second défaut d’été est présentée dans la Figure 5.34. L’indice de sévérité est négatif jusqu’à  $t = 0$  même s’il varie. À partir de  $t = 1$  il possède des valeurs positives bien que peu élevées.

La projection de ces points est présentée en Figure 5.34. Le point avec une valeur d’indice de sévérité négative est projeté dans la zone nominale. Pour les autres points ils ont bien été représentés dans la zone du second défaut unique. Il est également à noter que la projection respecte bien l’évolution des valeurs des SI, comme cela peut être vérifié avec la Figure 5.13.

*Le défaut de problème du capteur.*

Le dernier défaut d’été concernait la saturation d’un capteur. Ce défaut semble avoir été pris en charge par les équipes de maintenance car il n’est constaté aucun problème avec ce capteur

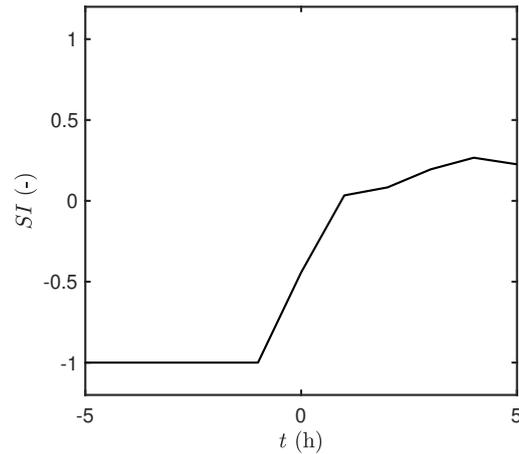


Figure 5.33 – Indicateurs de sévérité du défaut du problème de bypass.

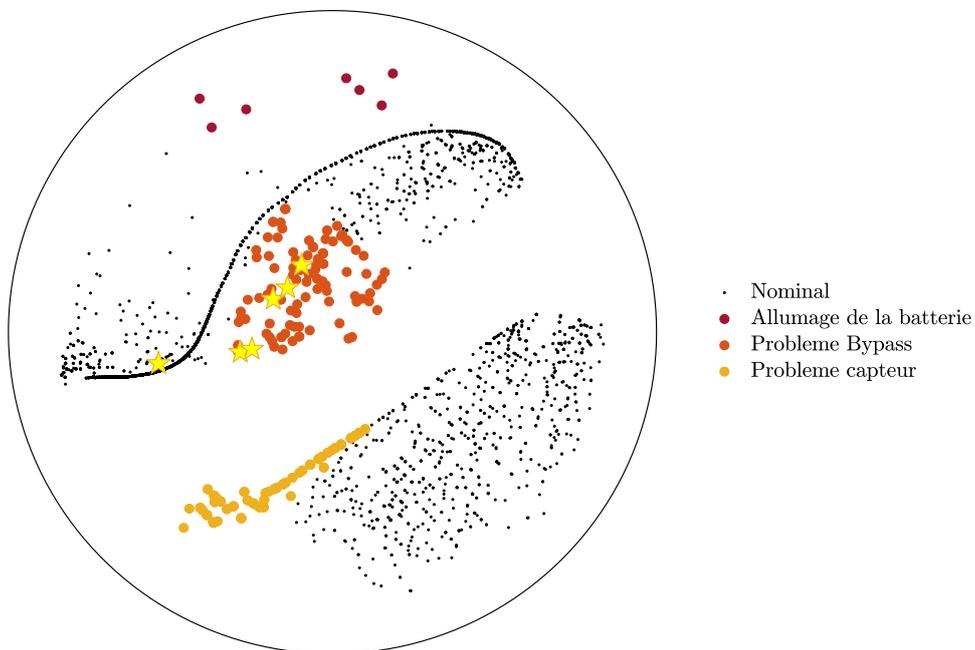


Figure 5.34 – Projection du défaut du problème de bypass.

durant la seconde année. De plus les SI ne montrent qu'une seule détection durant le traitement des données. Bien que cette détection soit le fruit d'un faux positif, sa projection va être présentée. L'évolution des indices de sévérité est fournie en Figure 5.35. Seule la valeur à  $t = 0$  est positive sur ce graphique.

La Figure 5.36 présente la carte d'été sur laquelle les données présentées sont projetées. Tous les points hormis celui ayant une valeur de SI négative sont représentés dans la zone nominale. Le point  $t = 0$  dont la valeur d'indice de sévérité est positive est projeté dans la zone du défaut concernant le défaut du problème de capteur.

#### *Les défauts couplés.*

L'illustration des défauts couplés est effectuée avec les défauts  $n^{\circ}1$  et  $n^{\circ}2$ . Les valeurs des indices de sévérité pour ces deux défauts sont présentées en Figures 5.37. Jusqu'à  $t = 0$  les valeurs des SI de ces deux défauts sont négatives. À partir de  $t = 0$ , les valeurs varient tout en restant

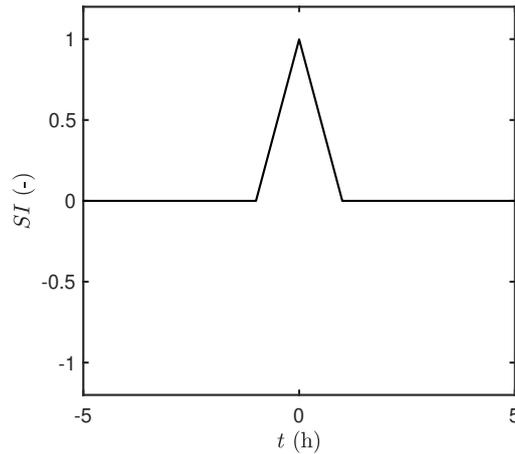


Figure 5.35 – Indicateurs de sévérité du problème de capteur.

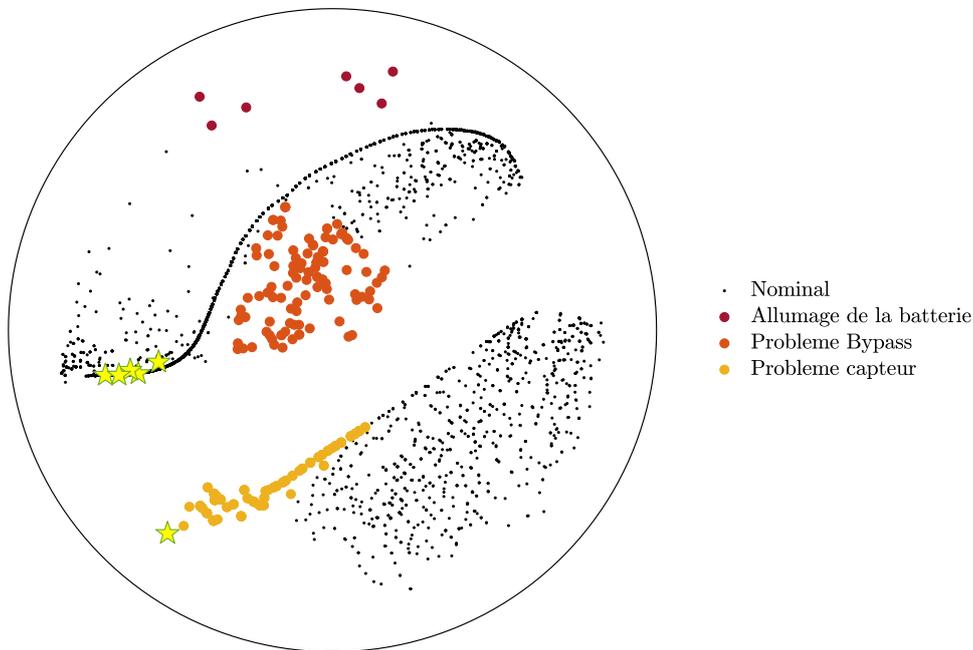


Figure 5.36 – Projection du problème de capteur.

positives.

Les projections de ces points de fonctionnement sont présentées en Figure 5.38. Le point  $t = 0$  pour lequel aucun défaut n'est encore détecté est bien situé dans la zone de fonctionnement nominal. Tous les autres points, ayant des valeurs de SI positives pour les deux défauts sont localisés dans la zone couplant les défauts d'allumage de la batterie et de bypass. Les points de  $t = 1$  à  $t = 3$  sont les trois points alignés sur la carte. Les deux se trouvant proches de la zone du défaut  $n^{\circ}1$  mais sur la droite correspondent aux points  $t = 1$  et  $t = 2$ . Cet emplacement est logique car ils possèdent une valeur de SI du défaut de problème du bypass inférieure. En revanche, le point le plus à gauche de ces trois projections, correspond au point  $t = 3$ . Il est à proximité des deux zones de défaut unique car il possède une valeur de SI faible, et il est relativement central car ces valeurs sont très proches. Le point  $t = 4$  est celui qui se trouve près de la zone du défaut de bypass et relativement éloigné de celle du défaut  $n^{\circ}1$ . Ce positionnement est correct car la valeur du SI du défaut  $n^{\circ}2$  est bien supérieure à celle du défaut  $n^{\circ}1$ . Pour finir le point  $t = 5$  est celui qui est le plus éloigné des deux zones de défaut unique car il possède une valeur de SI relativement haute

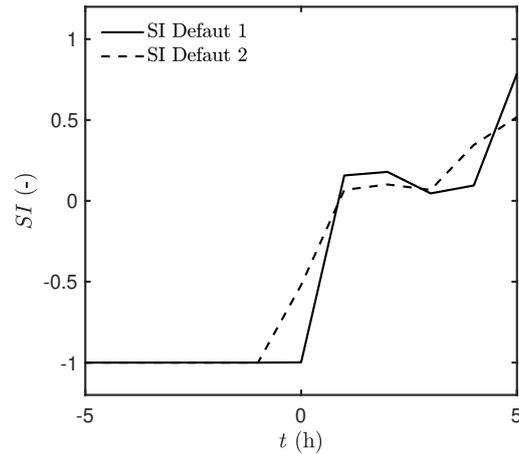


Figure 5.37 – Indicateurs de sévérité des défaut n°1 et n°2.

pour ces deux défauts.

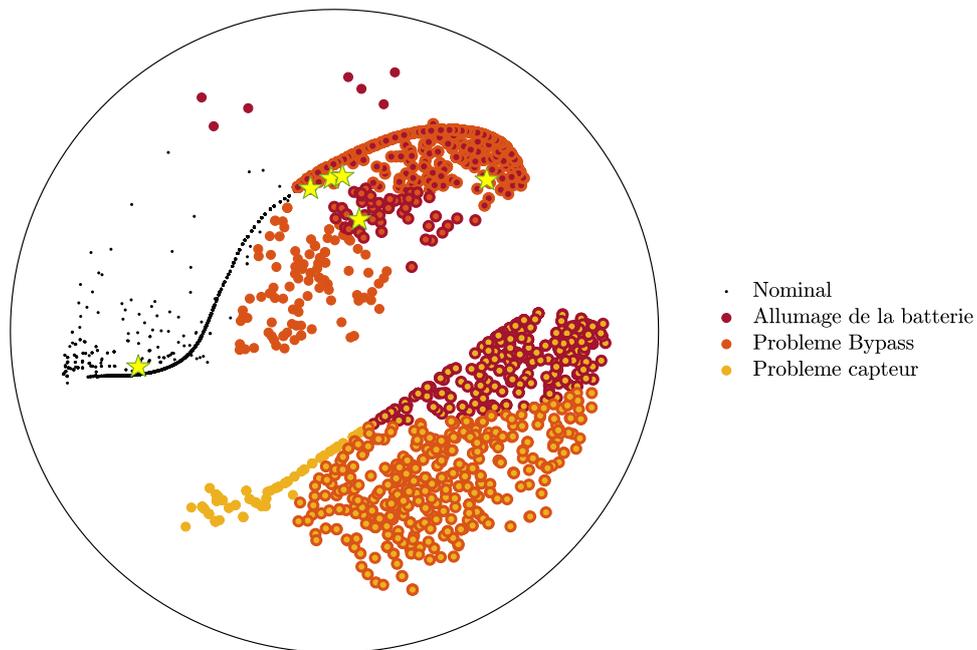


Figure 5.38 – Projection des défauts couplés de l'allumage de la batterie et de bypass.

## 5.6 Remarques complémentaires et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé des données de mesure d'un bâtiment réel, afin de prouver l'efficacité de la méthode lors d'utilisation en commissionnement de bâtiment existant. Dans un premier temps, les données d'une année complète ont été utilisées pour pouvoir générer les cartes qui serviront à la détection des défauts. Les cartes élaborées avec ces données permettent de mettre en évidence de façon claire les défauts. Dans un second temps l'efficacité de la méthode a été vérifiée sur une seconde année de mesure de ce même bâtiment. Les deux cartes saisonnières

ont été testées via la projection des données réelles de la seconde année. Ainsi, il a été vérifié que la projection à posteriori de données mesurées, qui sera réalisée sur site instantanément, est très précise. Les projections des défauts sont toujours effectuées dans les zones adéquates. L'intensité des défauts, exprimée par les indices de sévérité est également respectée lors des projections. Dans le cas des défauts couplés, la part de chacun des défauts dans l'indice de sévérité totale, correspondant à la détermination du défaut principal et secondaire est également respectée.

Ainsi ces étapes ont permis de valider l'utilisation de cette méthode dans le cas de re-commissionnement ou de commissionnement continu.

Concernant le cas d'étude mis en avant pour la validation de la méthode de détection de défaut dans le cas de commissionnement de bâtiments existants, certaines limitations peuvent être énoncées.

Tout d'abord, dans le cas d'implémentation *in situ* de ce type de méthode de FDD, plusieurs étapes doivent normalement être effectuées afin d'assurer une mise en place correcte de l'outil. Ces étapes correspondent à celles d'un processus de Cx. Le bâtiment, ses systèmes, leurs fonctionnements etc, doivent être analysés. Cela est habituellement effectué lors d'une phase d'audit, réalisée par l'ingénieur. Durant cette étape, des entretiens avec le MOA et les équipes techniques sont menés pour pouvoir définir et comprendre leurs attentes et ainsi pouvoir orienter la recherche des défauts.

Malheureusement, lors de cette étude aucune visite du site ou entretien avec les équipes techniques comme les propriétaires n'ont pu être réalisés. La confiance dans les données et les attentes, mais également dans les documents techniques étudiés, doit rester relativement faible. Ces dernières n'ont pas fait l'objet du processus de vérification poussé permettant l'établissement de leur *Ground truth*.

C'est pourquoi les règles permettant la mise en évidence des défauts restent *grossières* et ont été choisies sans passer par le processus d'entretien. Ces règles permettent la mise en évidence de *défauts* correspondant plutôt à des situations qu'il a été choisis de mettre en évidences, car elles sont considérées comme devant être évitées. C'est pour cela que l'outil dans le cadre de cette section peut être présenté comme un outil d'aide au suivi et au monitoring des équipes techniques.

Cette étude a également permis de mettre en évidence l'importance de l'élaboration des règles sur la base des expertises. Avec la projection de la seconde année sur les cartes de la première, il a pu être constaté l'apparition d'un faux-positif. Un défaut a été détecté par l'outil alors qu'il n'apparaissait manifestement pas. Ce défaut décelé sur un seul pas de temps au cours de la seconde année de fonctionnement, illustre également l'intérêt de l'évolutivité de cet outil. Si ce genre de sensibilité de la méthode se reproduit, les équipes de maintenance et d'exploitation devront faire remonter ce problème à l'ingénieur en charge de l'outil. Ainsi il y aura la nécessité de modifier les valeurs des règles, pour ajuster la précision du diagnostic. Ce problème ne conduit d'ailleurs pas à une phase de recréation de nouvelle carte, mais juste à un ajustement des sous règles.

Pour finir, il semble qu'il faille considérer qu'un nombre minimal de défauts puisse être instaurer afin de permettre la création de cartes visuellement *standardisées*. Il semblerait qu'un nombre faible de défauts ne conduise pas forcément au placement de la zone de fonctionnement nominal au centre des cartes. Ces types de carte sont moins intéressantes et induisent des zones de défauts couplés moins claires. Afin de simplifier encore l'analyse de ces cartes par le personnel, il serait intéressant de privilégier les cartes possédant une zone de fonctionnement nominal centrale.

Dans ce chapitre l'outil de détection de défauts développé a été testé dans le cas d'un commissionnement sur bâtiment existant. Il a pu être mis en évidence l'utilité de cette méthode dans l'aide au suivi et à la maintenance des systèmes en commissionnement continu. Ainsi, la capacité

de cet outil d'être utilisable sur les cas de commissionnement initial et continu est validée.



# 6

## Conclusion générale



---

<b>6.1 Synthèse</b> . . . . .	<b>176</b>
<b>6.2 Perspective</b> . . . . .	<b>179</b>

---

## 6.1 Synthèse

Depuis plus d'une décennie le secteur du bâtiment est le plus gros poste de consommation en énergie finale et ce constat est valable pour la France comme pour l'Europe ou les États-Unis [139, 165]. La part du secteur dans les consommations en énergie finale s'élève actuellement à 46 % pour la France [124]. Ce dernier est donc un levier essentiel pour les réductions de consommation d'énergie mais également d'émission de CO<sub>2</sub> fixées par les directives mondiales comme européennes. Parmi les consommations d'énergie liées au bâtiment entre 40 % et 60 % sont dues aux systèmes CVC [35, 68, 139, 149]. De plus, le suivi et monitoring des bâtiments ont mis en évidence que ces derniers ne fonctionnent pas de façon optimale. Des économies de l'ordre de 20 % à 30 % sur les consommations de ces systèmes peuvent être réalisées avec la mise en place de commissionnement ou de détection de défauts [15, 83]. Néanmoins, malgré cette efficacité avérée, les outils de FDD ont du mal à être installés massivement dans les bâtiments. Cette réticence à la mise en place de ces dispositifs est due à plusieurs raisons parmi lesquelles une complexité d'estimation de leur capacité, le manque d'adaptabilité ainsi que la complexité d'utilisation [15, 40, 94, 173]. C'est pourquoi ces travaux de thèse s'attachent à résoudre ces problèmes via le développement d'un nouvel outil de détection de défauts et de diagnostic. Ainsi, l'objectif est de proposer un outil de FDD pouvant être facilement adaptable aux différents systèmes et configurations, utilisable sur bâtiment neuf comme existant. De plus l'outil devra permettre de fournir un résultat facilement compréhensible, ne nécessitant pas de qualifications avancées de la part du personnel.

Afin de pouvoir développer un outil fiable, ce dernier doit pouvoir être testé sur des données réalistes. Cela signifie des données représentatives de celles qui seront par la suite traitées par l'outil par exemple en terme d'incertitude de mesures ou de fréquence minimale d'acquisition etc. Ces données doivent permettre la mise en évidence claire et indéniable des différents défauts apparaissant sur le fonctionnement du système. Pour cela, dans le Chapitre 2 des données ont été générées à l'aide d'un banc expérimental en espace semi contrôlé permettant de minimiser les incertitudes liées aux causes de l'apparition des défauts. De plus, cela permet de définir un protocole expérimental qui rend possible le contrôle de la qualité des données et donc des détections des défauts. Cette assurance de la validité des données est appelée *Ground truth*. Afin de maximiser le *Ground truth* des jeux de données, ces dernières doivent répondre à certaines exigences. Par exemple, les jeux de données défectueuses doivent pouvoir être identifiés par rapport à un jeu nominal dans les mêmes conditions. Elles doivent également permettre l'appréciation de l'apparition du défaut depuis un fonctionnement nominal, afin de pouvoir par la suite comparer la rapidité de réaction des différents outils.

Un total de 114 cas de fonctionnement d'un système de type CTA a été généré selon ces prescriptions. Ils permettent, l'appréciation de conditions nominales comme défaillantes selon deux régimes de fonctionnement saisonniers. Ce type de base de données permet d'envisager l'élaboration d'un référentiel futur rendant possible la comparaison des méthodes de détection de défauts.

L'outil de détection de défauts développé doit pouvoir permettre de répondre aux différentes problématiques énoncées préalablement, à savoir, être adaptatif, pouvoir être mis en place sur bâtiments neufs comme existants et limiter les besoins en terme de connaissances techniques de la part des utilisateurs. La méthode développée est une méthode dite hybride, reposant sur le savoir expert et le traitement des données de mesures. Son fonctionnement, présenté au Chapitre 3 repose sur une procédure en deux phases principales. La première est une phase d'ingénierie amont, servant à adapter la méthode au système étudié, elle est composée de deux étapes et nécessite la possession de données de fonctionnement du système. Durant la première étape appelée *Pré-traitement* des règles expertes sont élaborées afin de mettre en évidence les différents défauts souhaités. Lorsque ces règles sont établies les données de fonctionnement sont alors traitées par ces règles qui fi-

nissent par fournir un résultat appelé indice de sévérité permettant la détection des défauts. Lors de la seconde étape, des représentations en deux dimensions du fonctionnement du système appelées *cartes* sont élaborées. Ces cartes mettent en évidence des différents fonctionnements du système, nominal comme défaillant, par des zones distinctes, rendant simple l'appréciation de l'apparition de défaut. Ces cartes sont élaborées grâce au traitement des indices de sévérité via une méthode de réduction de dimension appelée ASKI. Ces cartes, explicites et intelligibles, facilitent la détection des défauts de la part des équipes techniques. Une fois ces cartes créées, elles peuvent être implémentées dans le système GTB pour effectuer de la détection en temps réel. La seconde phase de la procédure de la méthode de FDD débute après l'implémentation de l'outil. Elle permet la détection et le diagnostic instantanément, grâce à un traitement des données du dispositif de suivi. Les données relevées par la GTB sont directement traitées par les règles expertes afin de fournir les indices de sévérité. Ces derniers, obtenus à chaque mesure de la gestion technique du bâtiment, sont projetés grâce à une méthode appelée Radial Basis Function (RBF), sur les cartes réalisées en phase d'ingénierie amont. Le fonctionnement du système est alors représenté en temps réel sur les cartes préalablement établies.

Cet outil de détection de défauts se veut utilisable sur bâtiment neuf comme existant, c'est pourquoi il a été testé sur deux cas d'étude, celui d'un bâtiment en phase de commissionnement initial puis en phase de commissionnement continu.

Dans un cas de commissionnement initial, l'outil doit permettre dès la phase de réception du bâtiment de détecter l'apparition de défauts pouvant survenir sur un système. Néanmoins, aucune données historiques du bâtiment n'est disponible, puisque le bâtiment est neuf. Pour réaliser ce cas d'étude, si aucune donnée de référence n'existe, alors ces dernières peuvent être obtenues via des outils de modélisation. Afin de respecter ces conditions, un bâtiment existant dont plusieurs pièces techniques constitutives du dossier de consultation des entreprises sont en notre possession est modélisé dans le Chapitre 4. Ainsi ce bâtiment est modélisé sur le logiciel de simulation énergétique dynamique EnergyPlus. Le système de ventilation modélisé est identique à celui utilisé pour la génération des données expérimentales. C'est ce dernier qui est suivi par l'outil de détection de défauts. Des fonctionnements nominaux comme défaillants de ce système sont modélisés, pour la saison d'hiver et pour celle d'été. Les données de sortie de la modélisation sont analysées afin de vérifier leur fiabilité et d'assurer le *ground trust*. Ensuite, elles peuvent être utilisées pour élaborer les cartes de l'outil de FDD. La phase de *Pré-traitement* peut être exécutée. La première étape consiste en la confection des règles expertes mettant en évidence les défauts, ces dernières ne doivent utiliser que les données recueillies par la dispositif de GTB. Un total de 41 sous règles est créé afin de détecter 16 défauts répartis sur deux saisons. Les données de modélisation sont alors traitées par ces règles et les indices de sévérité sont réduits par la méthode ASKI pour fournir les cartes saisonnières.

Afin de vérifier la précision des cartes élaborées à partir de données de simulation, les données expérimentales générées au Chapitre 2 sont utilisées. Ces données sont traitées par les différentes règles expertes afin de fournir des indices de sévérité. Ces derniers sont alors représentés dans une dimension inférieure grâce à la méthode RBF puis projetés sur les cartes établies. Ainsi la qualité réelle à mettre en évidence des défauts des cartes générées est appréciée. Les cartes élaborées à partir des informations des pièces constitutives du marché permettent d'effectuer précisément de la détection et du diagnostic sur des données réelles. Tous les défauts apparaissant durant la période d'entraînement sont clairement identifiés et peuvent donc être détectés. Cela met en lumière l'efficacité de l'outil sur bâtiment neuf grâce à la méthodologie développée.

Pour évaluer l'efficacité de cet outil sur les bâtiments existants, ce dernier est testé sur des données de mesure d'un bâtiment réel dans le Chapitre 5. Lors de cette étude la méthode de détection de défauts est utilisée comme support au suivi ou commissionnement du système de ventilation. Un total de 16 règles expertes est créé pour la mise en évidence de neuf défauts sur deux saisons. Les données mesurées de la première année sont donc utilisées pour l'élaboration des cartes

de fonctionnement. Ainsi, elles sont traitées par les différentes règles pour fournir les indices de sévérité puis la méthode de réduction de dimension est effectuée afin de fournir les résultats en une représentation à deux dimensions. Les cartes générées sont claires, lisibles et permettent facilement la visualisation des différentes zones de fonctionnement nominales, ou avec des défauts simples comme couplés. Afin d'apprécier la validité de ces cartes, des données mesurées durant l'année suivante sont projetées sur les cartes. Grâce à cette étape, il est vérifié que les cartes sont efficaces d'une année sur l'autre. Les données de la seconde année sont alors traitées par les règles et puis réduites par la méthode RBF pour être représentées sur les cartes de l'année  $n - 1$ . Cela a permis de valider l'efficacité de ces cartes sur plusieurs années et que l'outil développé est efficace dans un contexte de commissionnement continu.

Ainsi, plusieurs constats peuvent être dressés. Tout d'abord, cet outil de FDD possède bien des capacités d'adaptabilité. En effet, le fait qu'il soit basé sur des règles issues de savoir expert, permet de l'adapter à tous système existant, indépendamment de la configuration de ses équipements, de ses points de mesures ou des demandes du Maître d'Ouvrage en terme de défauts. Cette méthode est donc extrêmement flexible, en revanche cela s'accompagne d'un travail plus conséquent en amont (*i.e.* phase de *Pré-traitement*). Le travail de développement des règles expertes nécessaires à la détection de défauts doit être effectué pour chaque système, configuration ou défaut différent. Cette adaptabilité est également vraie au cours du temps et peut donc être qualifiée d'évolutivité. En cas d'apparition de nouveaux défauts ou de disparition de défauts existants, des règles peuvent être ajoutées ou retirées et les cartes remises à jour.

Ensuite l'outil développé possède bien la capacité d'être utilisé et directement opérationnel sur des bâtiments neufs comme sur des bâtiments existants. Dans le cas de l'utilisation sur bâtiments neufs il sera nécessaire de réaliser des simulations énergétiques dynamiques. Le bâtiment avec ses systèmes et les comportements souhaités doivent être modélisés, mais également les fonctionnements avec des défauts. Les résultats générés permettent ainsi de construire les cartes de fonctionnement du système. Concernant les bâtiments existants, il est préférable que les cartes servant à la FDD soient élaborées à partir des données historiques du bâtiment. En cas de manque de ces données, des données issues de modélisation peuvent être utilisées pour générer les cartes de fonctionnement.

Pour finir cet outil est bien orienté utilisateur dans le sens où il limite les connaissances nécessaires à son utilisation. Ainsi, contrairement aux inconvénients souvent reportés des méthodes de FDD dans la littérature, il peut être utilisé simplement par le maître d'ouvrage, le personnel de maintenance ou même les équipes techniques, ne possédant pas forcément des compétences techniques avancées en matière de CVC. L'outil permet une détection et un diagnostic en temps réel fournis de façon visuelle sur des cartes. Ces cartes permettent d'identifier simplement et clairement les différents états de fonctionnement du système via des zones de couleur, sur lesquelles le fonctionnement du système se déplace en temps réel.

Pour conclure, les problématiques identifiées au Chapitre 1 concernant la création d'un outil de FDD qui soit générique adaptable à tous systèmes et configurations, mais également à toute échelle de bâtiment sont bien atteintes. La méthode permet également de fournir un résultat simple et compréhensible en temps réel de façon complètement automatisée, tout en limitant considérablement les besoins en terme de qualification de l'opérateur sur site. Une piste de travail a également été avancée à propos de l'estimation et de la comparaison des performances des outils de FDD pour simplifier la sélection des outils pour les Maîtres d'Ouvrage.

## 6.2 Perspective

Quelques perspectives de développement peuvent être définies dans l'objectif d'obtenir un outil de détection de défauts plus performant et simple d'utilisation.

Aussi, bien que cet outil soit opérationnel, l'efficacité de la méthode repose sur certaines précautions. Tout d'abord la phase d'ingénierie amont est tributaire de la richesse des données d'entrée pour l'élaboration des cartes. En effet, si dans le cas d'un bâtiment existant, les données ne comportent pas un défaut que l'on souhaite détecter, alors la méthode de réduction n'attribuera pas une zone optimale de détection de ce défaut. Même si la méthode peut être en mesure de détecter l'apparition du défaut, sa projection ne sera pas optimisée et il sera préférable de reconstruire une carte avec ces nouvelles données. C'est pourquoi, il semble important pour la communauté de détection de défaut du domaine CVC de s'équiper de bases de données de référence, comme énoncé au Chapitre 2. Ce type de jeux de données permettrait de pallier au problème de manque de données. Il semblerait qu'un format intéressant pour la génération et la diffusion de ces données de référence soit celui préalablement proposé. En effet, l'ébauche du référentiel proposé permet grâce à sa création et son formalisme de proposer des données fiables et vérifiables. Ce cadre est une base intéressante pour normer la génération et la diffusion de ce type de données, indispensables à l'étude et la comparaison des outils de FDD. Dans un second temps le développement et l'enrichissement de la base de données permettront d'augmenter la fiabilité des outils et la confiance à accorder aux différentes méthodes selon leurs applications. Il semble également important de complexifier ces jeux de données. Avec par exemple des couplages de *soft faults*, voir de fonctionnements non optimaux, qui sont plus compliqués à mettre en évidence. En multipliant la génération de ce type de défauts couplés, l'efficacité des outils de FDD en matière de détection de défauts multiples pourra être améliorée.

Dans le cas des bâtiments neufs, si aucune donnée de référence n'existe, alors les données de fonctionnement du système devront être modélisées. Néanmoins, il est vrai que la SED n'est pas encore une pratique répandue. Quant à la modélisation de défauts, cette pratique est peu courante en bureau d'étude et demande encore à être améliorée. De nombreux logiciels de modélisation devraient proposer cette fonctionnalité dont la demande ne va cesser de croître. Ces derniers devraient également proposer plus de modèles afin d'être le plus exhaustif possible en terme de génération de données avec défauts.

Deuxièmement, il serait intéressant de tester la méthode de FDD sur un cas réel de commissionnement initial. Ainsi, il pourrait être examiné plus en détail les capacités de l'outil pour cette application. Car, bien qu'en principe l'outil développé puisse s'adapter à tout type de configuration, comme de bâtiment, cela s'accompagne d'un effort de paramétrage accru. C'est pourquoi malgré la validation de son fonctionnement, il semble légitime de se questionner sur la viabilité de son implémentation pour les petits bâtiments. Pour cela, une étude approfondie permettant de déterminer la rentabilité économique de la méthode paraît indispensable. Il semblerait également judicieux de créer une carte allouée exclusivement aux tests de performances des systèmes. De la sorte, cette carte permettrait de mettre en évidence les problèmes de réglages ou de régulations initiaux, puis serait par la suite remplacée par des cartes couvrant des défauts de fonctionnements courants.

Un troisième point d'amélioration de l'outil concerne donc logiquement l'augmentation de l'automatisme durant la phase d'ingénierie d'amont. En effet, l'avantage de l'automatisme complet de cet outil est vrai pour l'utilisateur final, en revanche des progrès peuvent être réalisés sur la phase de création. En effet, une assistance quant à l'élaboration des règles via le développement d'une interface permettrait de simplifier cette première étape, bien qu'elle en diminuerait simultanément les possibilités. Un travail de revue de l'état de l'art en matière de règles de régulation, comme de défauts potentiels, serait la première étape de cette automatisation. Cette tâche permettrait donc de créer une base de données de règles et de sous règles mettant en évidence ces fonctionnements et défauts. Ainsi, ces dernières pourraient être sélectionnées et combinées à

l'appréciation de l'ingénieur en charge de l'adaptation de l'outil aux attentes du Maître d'Ouvrage.

Une aide quant à la sélection du nombre de proches voisins à sélectionner induirait également une diminution du temps d'ingénierie amont. Cette étape est relativement longue du fait qu'elle consiste en la génération de plusieurs cartes élaborées selon un nombre de proches voisins différents, puis d'une analyse visuelle de la pertinence de ces résultats. Un travail, basé sur les indicateurs de faux voisinage et de déchirement peut être mis en place afin de simplifier cette analyse.

Pour finir, il serait intéressant de se pencher sur les cartes et leurs qualités. Des indicateurs de leur qualité pourraient être créés afin de maximiser leur compréhension de la part des utilisateurs. Par exemple, le nombre optimal de défauts à représenter sur les cartes élaborées pourrait être étudié. Ainsi, il pourrait être judicieux de créer un nombre supérieur de cartes (pas seulement saisonnier) qui seraient plus contextualisées mais plus faciles à appréhender. Chaque carte comporterait alors un nombre inférieur de défauts qui seraient en revanche plus spécifiques à un régime de fonctionnement.

Il a été mis en évidence la capacité de l'outil en terme d'aide au suivi, mais un travail intéressant consisterait à développer cette capacité sur du suivi dans le cas de contrat de performance énergétique. En couplant un modèle de confort (de type *Predicted Mean Value*) avec les conditions extérieures et l'analyse des consommations, cet outil devrait être en mesure d'alerter les différentes parties prenantes en cas de dérive. Il pourrait également classifier l'évolution des conditions afin de déterminer si la variation des consommations est attribuable aux conditions extérieures, intérieures, ou aux mesures de conservation d'énergie. De cette façon les ambitions et objectifs (en termes de confort ou de consommation) ou la gestion du bâtiment peuvent être réajustés au plus tôt grâce à l'analyse de la supervision. Ainsi les objectifs pourront être assurés de façon plus fiable grâce à un retour beaucoup plus simple et rapide par l'analyse des cartes.

Une autre perspective intéressante, serait de coupler un modèle prédictif à cet outil. Ainsi, les opérations de maintenance pourraient être programmées afin d'effectuer des actions préventives plutôt que curatives. Néanmoins, ce type de prévention peut seulement être envisagé sur des *soft faults* comme pour le remplacement d'un filtre par exemple, mais pas pour les *hard faults* qui sont beaucoup moins prévisibles. Ce type de développement peut également être développé pour être relié aux prédictions météo. Ainsi en cas de panne, une estimation de l'évolution des températures ou des consommations pourrait être fournie. Les rapidités d'intervention et hiérarchie des opérations de maintenance pourraient alors être adaptées en fonction des évolutions prévues.



# Bibliographie

- [1] Manifold Learning. <https://scikit-learn.org/stable/modules/manifold.html>, 07 2020.
- [2] Air conditionning, Heating & Refregiration Institute. AHRI Standard 1061 (SI) - 2018 Standard for Performance Rating of Air-to-Air Exchangers for Energy Recovery Ventilation Equipement.pdf, 2018.
- [3] N. Almeida, V. Sousa, L. Alves Dias, and F. Branco. A framework for combining risk-management and performance-based building approaches. *Building Research & Information*, 38(2) :157–174, Apr. 2010.
- [4] American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Guideline 0. Technical report, Atlanta, 2015.
- [5] A. Andriamamonjy, D. Saelens, and R. Klein. An auto-deployed model-based fault detection and diagnosis approach for Air Handling Units using BIM and Modelica. *Automation in Construction*, 96 :508–526, Dec. 2018.
- [6] A. APOGEE. Revue pratique des logiciels de simulation énergétique dynamique (SED). Technical report, 2015.
- [7] ASHRAE. Method of Testing Air-to-Air Heat/Energy Exchangers - ANSI/ASHRAE Standard 84-2013, 2013.
- [8] S. Attia. Building Performance Simulation Tools : Selection Criteria and User Survey. Technical report, 2010.
- [9] A. Beghi, R. Brignoli, L. Cecchinato, G. Menegazzo, M. Rampazzo, and F. Simmini. Data-driven Fault Detection and Diagnosis for HVAC water chillers. *Control Engineering Practice*, 53 :79–91, Aug. 2016.
- [10] A. Beghi, L. Cecchinato, F. Paggiaro, and M. Rampazzo. VAVAC systems modeling and simulation for FDD applications. In *2011 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, pages 800–805, Santiago, Chile, Dec. 2011. IEEE.
- [11] Y. Bennani, S. Guérif, and E. Viennet. Réduction des dimensions des données en apprentissage artificiel. *Apprentissage Artificiel et Fouille de Données*, page 28, 2008.
- [12] P. Bertoldi and S. Rezessy. Energy Service Companies In Europe. Technical report, European commission, 2005.
- [13] P. Bertoldi, S. Rezessy, and E. Vine. Energy service companies in European countries : Current status and a strategy to foster their development. *Energy Policy*, 34(14) :1818–1832, Sept. 2006.
- [14] E. Borgstein, R. Lamberts, and J. Hensen. Mapping failures in energy and environmental performance of buildings. *Energy and Buildings*, Oct. 2017.
- [15] K. Bruton, P. Raftery, B. Kennedy, M. M. Keane, and D. T. J. O’Sullivan. Review of automated fault detection and diagnostic tools in air handling units. *Energy Efficiency*, 7(2) :335–351, Apr. 2014.
- [16] S. T. Bushby, N. Castro, M. A. Galler, and C. Park. Using the virtual cybernetic building testbed and FDD test shell for FDD tool development. Technical Report NIST IR 6818, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2001.

- [17] CanmetENERGIE. Aperçu des différents protocoles de mesurage et de vérification (M&V). Technical Report 2008-069\_TR\_424-CONOPT, 2008.
- [18] B. L. Capehart and M. R. Brambley, editors. *Automated Diagnostics and Analytics for Buildings*. Fairmont Press, Inc, Lilburn, GA, 2015. OCLC : ocn883649530.
- [19] L. Cayton. Algorithms for manifold learning. page 17, 2005.
- [20] Y. Chen, S. Huang, and D. Vrabie. A SIMULATION BASED APPROACH FOR IMPACT ASSESSMENT OF PHYSICAL FAULTS : LARGE COMMERCIAL BUILDING HVAC CASE STUDY. page 8, 2018.
- [21] H. Cheung, J. E. Braun, and M. R. Langner. Methodology to Assess No Touch Audit Software Using Simulated Building Utility Data. Technical Report NREL/TP-5500-66001, 1329171, Oct. 2016.
- [22] L. Chiang, E. Russell, and R. Braatz. *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*. Springer, 2001.
- [23] D. Coakley, P. Raftery, P. Molloy, and G. White. CALIBRATION OF A DETAILED BES MODEL TO MEASURED DATA USING AN EVIDENCE-BASED ANALYTICAL OPTIMISATION APPROACH. page 9, 2011.
- [24] Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU. Rapport Brundtland - Our Common Future. page 349, 1987.
- [25] P. E. Conservatio. National Strategy for Building Commissioning. Technical report, Inc., 1998.
- [26] C. Costa and M. Jouvent. PLAN BATIMENT GRENELLE - La Garantie de Performance Energétique. Technical report, 2012.
- [27] R. C. Coyner and S. W. Kramer. Long Term Benefits of Building Commissioning : Should Owners Pay the Price? *Procedia Engineering*, 196 :429–435, 2017.
- [28] D. B. Crawley, D. B. Shirey, and M. C. Steve. ASHRAE 169-2013 - Climatic Data for Building Design Standards. Technical Report 169 -2013, 2013.
- [29] CSTB. *Etablir et Mettre En Oeuvre Un Contrat de Performance Énergétique*. 2014.
- [30] CSTB. Avis Technique 14.5/14-2055\_V1 - Système de ventilation double flux Exhaust and supply ventilation system. Technical Report 14.5/14-2055\_V1, 2019.
- [31] X. Dai and Z. Gao. From Model, Signal to Knowledge : A Data-Driven Perspective of Fault Detection and Diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(4) :2226–2238, Nov. 2013.
- [32] S. Dash and V. Venkatasubramanian. Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7) :785–791, July 2000.
- [33] C. de Bodt, D. Mulders, M. Verleysen, and J. A. Lee. Perplexity-free t-SNE and twice Student tt-SNE. *Computational Intelligence*, page 6, 2018.
- [34] P. de Wilde. The gap between predicted and measured energy performance of buildings : A framework for investigation. *Automation in Construction*, 41 :40–49, May 2014.
- [35] S. Dechert. Better Buildings Saves 1 Billion In Energy Opens Online Solution Center. 2015.
- [36] F. Degret and S. Lespinats. Circular background decreases misunderstanding of multi-dimensional scaling results for naive readers. *MATEC Web of Conferences*, 189 :10002, 2018.
- [37] Q. Deng, X. Jiang, Q. Cui, and L. Zhang. Strategic design of cost savings guarantee in energy performance contracting under uncertainty. *Applied Energy*, 139 :68–80, Feb. 2015.

- 
- [38] DIN. DIN 33403 - Climate at the workplace and its environments. Norme DIN 33 403, 1997.
- [39] N. Djuric, F. Frydenlund, V. Novakovic, and J. Holst. Preliminary step in collecting data for commissioning of existing buildings (characterization of buildings, systems and problems). *Proceedings of the Clima 2007 WellBeing Indoors*, 2007.
- [40] N. Djuric and V. Novakovic. Review of possibilities and necessities for building lifetime commissioning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2) :486–492, Feb. 2009.
- [41] U. DOE. Building Energy Software Tools Directory. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename\\_menu=whole\\_building\\_analysis/pagename\\_submenu=energy\\_simulation](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=energy_simulation).
- [42] U. DOE. Plant Application Guide. page 99.
- [43] U. DOE. Application Guide for EMS. page 117, 2017.
- [44] U. DOE. Auxiliary EnergyPlus Programs. page 144, 2017.
- [45] U. DOE. Engineering Reference. page 1704, 2017.
- [46] U. DOE. Input Output Reference. page 2657, 2017.
- [47] U. DOE. EnergyPlus Essentials. Technical report, 2019.
- [48] P. G. Ellis, P. A. Torcellini, and D. B. Crawley. Simulation of Energy Management Systems in EnergyPlus. In *Building Simulation*, page 9, 2007.
- [49] P. Européen and Conseil. Directive 2002/91/EC, 16 decembre 2002.
- [50] P. Européen and Conseil. Directive 2010/31/UE, May 2010.
- [51] P. Européen and Conseil. Directive 2012/27/EU, Oct. 2012.
- [52] C. Européenne. Package of Implementation measures for the EU’s objectives on climate change and renewable energy for 2020. Technical Report SEC 2008 85/3, Commission Européenne, Brussels, 2008.
- [53] C. Européenne. Résumé de l’analyse d’impact de la refonte de la directive sur la performance énergétiques des bâtiments. Technical Report COM(2008) 780 final -SEC(2008) 2864, Nov. 2008.
- [54] C. Européenne. 2030 Climate and energy policy framework. Conclusion EUCO 169/14, Brussels, 2014.
- [55] C. Européenne. *EU Energy, Transport and GHG Emissions : Trends to 2050*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014.
- [56] C. Européenne. Recommandation de la Commission (UE) sur la rénovation des bâtiments. Technical Report C(2019) 3352, May 2019.
- [57] EVO. IPMVP vol.1. Technical report, 2012.
- [58] G. A. Faggianelli, L. Mora, and R. Merheb. Uncertainty quantification for Energy Savings Performance Contracting : Application to an office building. *Energy and Buildings*, 152 :61–72, Oct. 2017.
- [59] S. Frank, X. Jin, D. Studer, and A. Farthing. Assessing barriers and research challenges for automated fault detection and diagnosis technology for small commercial buildings in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98 :489–499, Dec. 2018.
- [60] S. Frank, G. Lin, X. Jin, R. Singla, A. Farthing, and J. Granderson. A performance evaluation framework for building fault detection and diagnosis algorithms. *Energy and Buildings*, 192 :84–92, June 2019.
-

- [61] H. Friedman and M. A. Piette. Comparative guide to emerging diagnostic tools for large commercial HVAC systems. Technical Report LBNL-48629, CD-435, 787155, May 2001.
- [62] M. Garbuzova-Schlifter and R. Madlener. AHP-based risk analysis of energy performance contracting projects in Russia. *Energy Policy*, 97 :559–581, Oct. 2016.
- [63] A. S. Glass, P. Gruber, M. Roos, and J. Todtli. Qualitative model-based fault detection in air-handling units. *IEEE Control Systems*, 15(4) :11–22, Aug. 1995.
- [64] C. A. Goldman, N. C. Hopper, and J. G. Osborn. Review of US ESCO industry market trends : An empirical analysis of project data. *Energy Policy*, 33(3) :387–405, Feb. 2005.
- [65] I. Hagler Bailly Consulting. Building commissioning : Survey of attitudes and practices in Wisconsin. Technical Report 172-1, 1998.
- [66] S. J. Hansen. *Performance Contracting : Expanding Horizons*. The Fairmont Press, Inc., 2006.
- [67] M. R. Hargan. ASHRAE GUIDELINE - Measurement of Energy and Demand Savings. Technical report, 2002.
- [68] V. Harish and A. Kumar. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 :1272–1292, Apr. 2016.
- [69] R. Hart. Where’s the Beef in Continuous Commissioning ? Results from 140 Buildings in Commercial Property and Higher Education. page 13, 2012.
- [70] P. Haves. Fault modelling in component--based HVAC simulation. page 8, 1997.
- [71] J. L. M. Hensen. Towards more effective use of building performance simulation in design. page 18, 2004.
- [72] H. H. Herr. *Génie énergétique et climatique production de froid et fluides frigorigènes : climatisation et traitement d’air : pompes à chaleur*. 2014. OCLC : 951818250.
- [73] G. E. Hinton and S. T. Roweis. Stochastic Neighbor Embedding. *Advances in Neural Information Processing Systems 15*, page 8, 2002.
- [74] T. Hong, J. Langevin, and K. Sun. Building simulation : Ten challenges. *Building Simulation*, 11(5) :871–898, Oct. 2018.
- [75] H. Hotelling. ANALYSIS OF A COMPLEX OF STATISTICAL VARIABLES INTO PRINCIPAL COMPONENTS. page 25, 1933.
- [76] J. House, W. Lee, and D. Shin. Classification techniques for fault detection and diagnosis of an air handling unit.pdf. *ASHRAE Transactions*, 105, 1999.
- [77] M. Huet and M. Jouvent. PLAN BATIMENT DURABLE - La Garantie De Performance Energétique. Technical report, 2013.
- [78] G. Hugo, B. Julien, G. Evelyne, B. Catherine, and S. Gérard. Experimental dataset on an air handling unit for testing hvac automated fault detection and diagnosis tools. *Energy and Buildings*, In submission.
- [79] X. Huo and A. K. Smith. A SURVEY OF MANIFOLD-BASED LEARNING METHODS. page 34, 2004.
- [80] J. Hyvärinen and I. E. Agency, editors. *Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book*. Number [IEA-ECB & CS] ; Annex 25 Report Vol. 1 in International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis. VTT Building Technology, Espoo, 1996. OCLC : 246254321.
- [81] J. Hyvärinen, J. Visier, M. Stilianou, H. Yoshida, K. Sagara, and et.al. Annex 25 : Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnostics. Technical report, 1999.

- 
- [82] IBPSA - USA. Building Energy Software Tools List. <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software-listing>.
- [83] IEA. Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance. Technical Report Annex 34, 2006.
- [84] INSEE. INSEE référence - Edition 2020 - Logement. Technical report, 2020.
- [85] R. Isermann and M. Münchhof. *Identification of Dynamic Systems : An Introduction with Applications*. Springer, Berlin, 2011. OCLC : 845689930.
- [86] U. JO(18). Directive (UE) 2018/ du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018, June 2018.
- [87] JO(19). Décret n° 2019-771 du 23 juillet 2019 relatif aux obligations d’actions de réduction de la consommation d’énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire, July 2019.
- [88] JO(1983). Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l’aération des logements, Mar. 1982.
- [89] JORF. Arrêté du 22 mars 2017.
- [90] JORF. Arrêté du 8 août 2008, Sept. 2008.
- [91] JORF. LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l’environnement (1), July 2010.
- [92] JORF. LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l’environnement (1), May 2011.
- [93] S. Katipamula and M. Brambley. Review Article : Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I. *HVAC&R Research*, 11(1) :3–25, Jan. 2005.
- [94] S. Katipamula and M. R. Brambley. Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems— A Review, Part II. 11(2) :19, 2005.
- [95] S. Katipamula, K. Gowri, and G. Hernandez. An open-source automated continuous condition-based maintenance platform for commercial buildings. *Science and Technology for the Built Environment*, page 12, 2016.
- [96] S. Katipamula, W. Kim, R. G. Lutes, and R. M. Underhill. Rooftop unit embedded diagnostics : Automated fault detection and diagnostics (AFDD) development, field testing and validation. Technical Report PNNL–23790, 1222906, Sept. 2015.
- [97] S. Katipamula, R. G. Pratt, D. P. Chassin, Z. T. Taylor, K. Gowri, and M. R. Brambley. Automated Fault Detection and Diagnostics for Outdoor-Air Ventilation Systems and Economizers : Methodology and Results from Field Testing. page 13, 1999.
- [98] G. E. Kelly. AN OVERVIEW OF HVACSIM+, A DYNAMIC BUILDING /HVAC/ CONTROL SYSTEMS SIMULATION PROGRAM. page 11.
- [99] R. Khire and M. Trcka. MODEL BASED FAILURE MODE EFFECT ANALYSIS ON WHOLE BUILDING ENERGY PERFORMANCE. In *Proceedings of BS2013*, Chambéry, France, 2013.
- [100] J. Kim, S. Frank, J. E. Braun, and D. Goldwasser. Representing Small Commercial Building Faults in EnergyPlus, Part I : Model Development. *Buildings*, 9(11) :233, Nov. 2019.
- [101] J. Kim, S. Frank, P. Im, J. E. Braun, D. Goldwasser, and M. Leach. Representing Small Commercial Building Faults in EnergyPlus, Part II : Model Validation. *Buildings*, 9(12) :239, Nov. 2019.
- [102] W. Kim and S. Katipamula. A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(1) :3–21, Jan. 2018.
- [103] L. B. Lab and J. J. Hirsch. DOE-2 Reference Manual Version 2.1. page 994.
-

- [104] S. Lazarova-Molnar, H. R. Shaker, N. Mohamed, and B. N. Jorgensen. Fault detection and diagnosis for smart buildings : State of the art, trends and challenges. In *2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*, pages 1–7, Muscat, Mar. 2016. IEEE.
- [105] J. A. Lee and M. Verleysen. *Nonlinear Dimensionality Reduction*. Information Science and Statistics. Springer, New York, 2007.
- [106] P. Lee, P. Lam, and W. Lee. Risks in Energy Performance Contracting (EPC) projects. *Energy and Buildings*, 92 :116–127, Apr. 2015.
- [107] S. Lespinats and M. Aupetit. False neighbourhoods and tears are the main mapping defaults. How to avoid it? How to exhibit remaining ones? page 11, 2009.
- [108] S. Lespinats and M. Aupetit. Mapping without visualizing local default is nonsense. page 7, 2010.
- [109] S. Lespinats, A. Guerin, and J. Herault. RankVisu : Une représentation de données à partir du réseau de voisinage, 2006.
- [110] S. Lespinats, M. Verleysen, A. Giron, and B. Fertil. DD-HDS : A Method for Visualization and Exploration of High-Dimensional Data. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 18(5) :1265–1279, Sept. 2007.
- [111] S. Li and J. Wen. Development and Validation of a Dynamic Air Handling Unit Model, Part I. *ASHRAE Transactions*, 116(1) :45–46, 2010.
- [112] S. Li, J. Wen, X. Zhou, and C. Klaasen. Development and Validation of a Dynamic Air Handling Unit Model, Part II. *ASHRAE Transactions*, 116(1) :57–73, 2010.
- [113] Y. Li and Z. O’Neill. An EnergyPlus/OpenStudio-based Fault Simulator for Buildings. page 9, 2016.
- [114] Y. Li and Z. O’Neill. A critical review of fault modeling of HVAC systems in buildings. *Building Simulation*, 11(5) :953–975, Oct. 2018.
- [115] Y. Li and Z. O’Neill. An innovative fault impact analysis framework for enhancing building operations. *Energy and Buildings*, 199 :311–331, Sept. 2019.
- [116] Li Deng. The MNIST Database of Handwritten Digit Images for Machine Learning Research. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(6) :141–142, Nov. 2012.
- [117] W. Lia, B. James, S. Dale, S. John, A. Erica, D. Steve, and F. David. M&V Guidelines : Measurement and Verification for Performance-Based Contract Version 4.0. Technical report, U.S. Department of Energy, 2015.
- [118] J. Liang and R. Du. Model-based Fault Detection and Diagnosis of HVAC systems using Support Vector Machine method. *International Journal of Refrigeration*, 30(6) :1104–1114, Sept. 2007.
- [119] J. Littlewood, C. Spataru, R. J. Howlett, and L. C. Jain, editors. *Smart Energy Control Systems for Sustainable Buildings*, volume 67 of *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [120] M. Liu, C. David E., and T. W. Dan. *Continuous Commissioning Guidebook - Maximizing Building Energy Efficiency and Comfort*. FEMP, 2002.
- [121] T. Matthew and A. Pentland. Eigenfaces for Recognition. *Journal of cognitive neuroscience*, page 16, 1991.
- [122] E. Mills. Building commissioning : A golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions in the United States. *Energy Efficiency*, 4(2) :145–173, May 2011.

- 
- [123] E. Mills, S. Kromer, G. Weiss, and P. A. Mathew. From volatility to value : Analysing and managing financial and performance risk in energy savings projects. *Energy Policy*, 34(2) :188–199, Jan. 2006.
- [124] Ministère de la transition écologique et solidaire. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2019. Technical report, 2019.
- [125] Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2016. Technical report, 2017.
- [126] Ministère du logement, de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments autres que ceux concernés par l'article 2 du décret du 26 octobre 2010 relatif aux c...
- [127] NREL. Daylighting :Control not working with default values for extra reference points. <https://github.com/NREL/EnergyPlus/issues/5944>.
- [128] NREL. FaultModel is not working as expected. <https://github.com/NREL/EnergyPlus/issues/6457>.
- [129] NREL. FaultPropertiesAirFilter : :CheckFaultyAirFilterFanCurve is called before sizing occurs. <https://github.com/NREL/EnergyPlus/issues/7896>.
- [130] NREL. Operational Fault model for Coil Fouling appears to do nothing. <https://github.com/NREL/EnergyPlus/issues/5523>.
- [131] NREL. Optimum start overriding unoccupied thermostat setpoints to occupied setpoints post-occupancy. <https://github.com/NREL/EnergyPlus/issues/7866>.
- [132] NREL. Plant operation scheme issues. <https://github.com/NREL/EnergyPlus/issues/5046>.
- [133] Z. O'Neill and X. Chang. A modelica-based dynamic fault simulator for air handler units. In *ASHRAE Annual Meeting*, Montréal, QC, Canada, 2011.
- [134] M. Padilla and D. Choinière. A combined passive-active sensor fault detection and isolation approach for air handling units. *Energy and Buildings*, 99 :214–219, July 2015.
- [135] B. Painter, N. Brown, and M. J. Cook. Practical application of a sensor overlay system for building monitoring and commissioning. *Energy and Buildings*, 48 :29–39, May 2012.
- [136] C. Park. HVACSIM user's guide update. Technical Report NIST IR 7514, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2008.
- [137] J. F. Pascual, R. Sterling, J. I. Torrens, and M. M. Keane. HEAT VENTILATION AND AIR CONDITIONING MODELLING FOR MODEL BASED FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS. In *Proceedings of BS2013*, Chambéry, France, 2013.
- [138] K. Pearson. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, (2) :559–572, 1901.
- [139] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3) :394–398, Jan. 2008.
- [140] G. Pernigotto and A. Gasparella. Classification of European Climates for Building Energy Simulation Analyses. page 12, 2018.
- [141] K. W. Peterson, N. Ferzacca, S. D. Kennedy, and M. M. MacCracken. ASHRAE 189.1-Standard for the Design of High-Performance Green Buildings. Technical Report 189.1, 2010.
- [142] M. A. Piette, S. K. Kinney, and P. Haves. Analysis of an information monitoring and diagnostic system to improve building operations. *Energy and Buildings*, 33(8) :783–791, Oct. 2001.

- [143] M. A. Piette, B. Nordman, and S. Greenberg. Quantifying Energy Savings from Commissioning : Preliminary Results from the Pacific Northwest. In *Proceedings of the Second National Conference on Building Commissioning*. Portland Energy Conservation, 1994.
- [144] A. D. Poole, T. H. Stoner, and E. International. Sponsored by the USAID Brazilian Clean and Efficient Energy Program (BCEEP), administered by Winrock International. page 10, 2003.
- [145] S. Pourarian. *Tools for Evaluating Fault Detection and Diagnostic Methods for HVAC Secondary Systems*. PhD thesis, 2015.
- [146] S. Pourarian, J. Wen, X. Li, D. Veronica, X. Zhou, and R. Liu. TOOLS FOR EVALUATING AIR FLOW NETWORK OF DUAL DUCT DOUBLE FAN SYSTEMS. page 9, 2014.
- [147] S. Pourarian, J. Wen, D. Veronica, A. Pertzborn, X. Zhou, and R. Liu. A tool for evaluating fault detection and diagnostic methods for fan coil units. *Energy and Buildings*, 136 :151–160, Feb. 2017.
- [148] T. A. Reddy. Automated Fault Detection and Diagnosis for HVAC&R Systems : Functional Description and Lessons Learnt. In *ASME 2008 2nd International Conference on Energy Sustainability, Volume 1*, pages 589–599, Jacksonville, Florida, USA, 2008. ASME.
- [149] C. Residovic. The New NABERS Indoor Environment tool – the Next Frontier for Australian Buildings. *Procedia Engineering*, 180 :303–310, 2017.
- [150] K. W. Roth, D. Westphalen, P. Llana, and M. Feng. The Energy Impact of Faults in U.S. Commercial Buildings. page 9, 2004.
- [151] E. M. Ryan and T. F. Sanquist. Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions. *Energy and Buildings*, 47 :375–382, Apr. 2012.
- [152] J. Schein, S. T. Bushby, and N. S. Castro. Results from field testing of air handling unit and variable air volume box fault detection tools. Technical Report NIST IR 6994, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2003.
- [153] J. Schein, S. T. Bushby, N. S. Castro, and J. M. House. A rule-based fault detection method for air handling units. *Energy and Buildings*, 38(12) :1485–1492, Dec. 2006.
- [154] T. Shang, K. Zhang, P. Liu, and Z. Chen. A review of energy performance contracting business models : Status and recommendation. *Sustainable Cities and Society*, 34 :203–210, Oct. 2017.
- [155] J. Shiozaki and F. Miyasaka. A FAULT DIAGNOSIS TOOL FOR HVAC SYSTEMS USING QUALITATIVE REASONING ALGORITHM. *Proceedings of the Building Simulation 1999*, 6th IBPSA Conference, Kyoto Japan :6, 1999.
- [156] J. Singh, editor. *Public Procurement of Energy Efficiency Services : Lessons from International Experience*. Directions in Development. Energy and Mining. World Bank : ES-MAP/Energy Sector Management Assistance Program, Washington, D.C, 2010. OCLC : ocn422756066.
- [157] B. B. S. Slama. LA SIMULATION DYNAMIQUE : STD, SED, COMPORTEMENT. page 23.
- [158] R. Sterling, G. Provan, J. Febres, D. O’Sullivan, P. Struss, and M. M. Keane. Model-based Fault Detection and Diagnosis of Air Handling Units : A Comparison of Methodologies. *Energy Procedia*, 62 :686–693, 2014.
- [159] R. Sterling, P. Struß, J. Febres, U. Sabir, and M. Keane. From Modelica Models to Fault Diagnosis in Air Handling Units. In *The 10th International Modelica Conference, March 10-12, 2014, Lund, Sweden*, pages 447–454, Mar. 2014.
- [160] J. R. Taylor. *An Introduction to Error Analysis - The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 2 edition.

- 
- [161] J. B. Tenenbaum, V. de Silva, and J. C. Langford. A Global Geometric Framework for Nonlinear Dimensionality Reduction. *Science, New Series*, 290(5500) :2319–2323, 2000.
- [162] H. Teraoka, B. Balaji, R. Zhang, A. Nwokafor, B. Narayanaswamy, and Y. Agarwal. BuildingSherlock : Fault Management Framework for HVAC Systems in Commercial Buildings. page 10, 2014.
- [163] T. Tetreault and S. Regenthal. ESPC Overview : Cash Flows, Scenarios, and Associated Diagrams for Energy Savings Performance Contracts. *Renewable Energy*, page 20, 2011.
- [164] W. S. Torgerson. Multidimensional scaling : I. Theory and method. *Psychometrika*, 17(4) :401–419, Dec. 1952.
- [165] US Department of Energy. *Buildings Energy Data Book*. 2012.
- [166] L. van der Maaten and G. Hinton. Visualizing Data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 2009.
- [167] L. van der Maaten, E. Postma, and V. d. H. Jaap. Dimensionality Reduction : A Comparative Review. page 36.
- [168] S. van der Straten, J. L. M. Hensen, J. D. Bynum, and M. H. H. Mohamed. A COMPARISON BETWEEN THE CALIBRATION OF LOW-RESOLUTION AND DETAILED FDD SIMULATION TOOLS IN THE POST-DESIGN PHASE. page 34, 2015.
- [169] C. van Dronkelaar, M. Dowson, C. Spataru, and D. Mumovic. A Review of the Regulatory Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-domestic Buildings. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1, Jan. 2016.
- [170] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. N. Ka. A review of process fault detection and diagnosis Part II : Qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, page 14, 2003.
- [171] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Ka, and K. Yin. A review of process fault detection and diagnosis Part III : Process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, page 20, 2003.
- [172] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S. N. Ka. A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, page 19, 2003.
- [173] H. Wang, Y. Chen, C. W. Chan, and J. Qin. An online fault diagnosis tool of VAV terminals for building management and control systems. *Automation in Construction*, 22 :203–211, Mar. 2012.
- [174] L. Wang, S. Greenberg, J. Fiegel, A. Rubalcava, S. Earni, X. Pang, R. Yin, S. Woodworth, and J. Hernandez-Maldonado. Monitoring-based HVAC commissioning of an existing office building for energy efficiency. *Applied Energy*, 102 :1382–1390, 2013.
- [175] L. Wang and T. Hong. Modeling and Simulation of HVAC Faulty Operations and Performance Degradation due to Maintenance Issues. page 11, 2013.
- [176] S. Wang and J. Cui. Sensor-fault detection, diagnosis and estimation for centrifugal chiller systems using principal-component analysis method. *Applied Energy*, 82(3) :197–213, Nov. 2005.
- [177] S. Wang and F. Xiao. Detection and diagnosis of AHU sensor faults using principal component analysis method. *Energy Conversion and Management*, 45(17) :2667–2686, Oct. 2004.
- [178] J. Wen and S. Li. Tools for Evaluating Fault Detection and Diagnostic Methods for Air-Handling Units. Final 1312-RP, 2011.
- [179] S. Willskyi. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems. page 11, 1976.
-

- [180] F. Xiao and S. Wang. Progress and methodologies of lifecycle commissioning of HVAC systems to enhance building sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5) :1144–1149, June 2009.
- [181] C. Ying and B. Joseph. Sensor fault detection using noise analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, (39 (2), 396-407), 2000.
- [182] Y. Yu, D. Woradechjumroen, and D. Yu. A Review of Fault Detection and Diagnosis Methodologies on Air-Handling Units. *Energy and Buildings*, 82 :550–562, Oct. 2014.
- [183] D. P. Yuill and J. E. Braun. Evaluating the performance of fault detection and diagnostics protocols applied to air-cooled unitary air-conditioning equipment. *HVAC&R Research*, 19(7) :882–891, Oct. 2013.
- [184] R. Zhang and T. Hong. MODELING AND SIMULATION OF OPERATIONAL FAULTS OF HVAC SYSTEMS USING ENERGYPLUS. page 8, 2016.
- [185] R. Zhang and T. Hong. Modeling of HVAC operational faults in building performance simulation. *Applied Energy*, 202 :178–188, Sept. 2017.
- [186] X. Zhang and H. Gao. Optimal Performance-Based Building Facility Management. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(4) :269–284, May 2010.



## Table des figures

1.1	Application de la RT existant. . . . .	3
1.2	Exemple des Garanties de Performance Énergétiques. . . . .	6
1.3	Principe de la garantie de performance énergétique. . . . .	7
1.4	Principe du partage des économies d'énergie. . . . .	8
1.5	Principe du modèle Chaffee. . . . .	8
1.6	Historique énergétique selon l'IPMVP. . . . .	10
1.7	Hierarchie des besoins du bâtiment. . . . .	15
1.8	Commissioning dans les marchés. . . . .	15
1.9	Évolution des consommation selon le type de Cx. . . . .	19
1.10	Déroulement de la FDD. . . . .	21
1.11	Méthode du résidu sur la sortie. . . . .	22
1.12	Méthode de l'estimation de paramètres. . . . .	22
1.13	Exemple d'un système de cuves et son SGV. . . . .	24
2.1	Illustration de la mise en évidence des défauts. . . . .	33
2.2	Méthodologie de comparaison des outils de FDD inspiré par [60]. . . . .	34
2.3	Schéma de principe de la CTA. . . . .	39
2.4	Plan simplifié de la salle alimentée par la CTA. . . . .	40
2.5	Densité de probabilité des températures pour la saison d'été (a) et d'hiver (b). . . . .	45
2.6	Arbre des défauts réalisés durant la saison d'été (a) et d'hiver (b). . . . .	47
2.7	Points de fonctionnement du ventilateur. . . . .	48
2.8	Données expérimentales pour la panne du ventilateur de soufflage en petit débit. . . . .	51
2.9	Données expérimentales pour la panne du ventilateur d'extraction en petit débit. . . . .	52
2.10	Données expérimentales pour l'obstruction des conduites de soufflage (a) et d'extraction (b) en faible débit. . . . .	53
2.11	Données expérimentales pour la rupture de la courroie du ventilateur de soufflage à grand débit. . . . .	54
2.12	Données expérimentales pour la rupture de la courroie du ventilateur d'extraction à grand débit. . . . .	54
2.13	Données expérimentales pour l'encrassement du filtre sur la conduite de soufflage. . . . .	55
2.14	Évolution des débits sur la gaine de soufflage (a) et de l'efficacité de l'échangeur (b) en fonction de l'encrassement. . . . .	55
2.15	Données expérimentales pour l'encrassement du filtre sur la conduite de soufflage. . . . .	56
2.16	Évolution des débits sur la gaine de soufflage (a) et de l'efficacité de l'échangeur (b) en fonction de l'encrassement. . . . .	56
2.17	Données expérimentales pour le fonctionnement nominal du système en petite vitesse. . . . .	57
2.18	Données expérimentales pour le fonctionnement nominal du bypass en grand débit. . . . .	58
2.19	Données expérimentales pour le fonctionnement nominal du bypass en petit débit. . . . .	59
2.20	Données expérimentales du défaut du bypass en grand débit : non-activation du volet et débit constant. . . . .	60

2.21	Données expérimentales du défaut du bypass en grand débit : activation du volet et débit décroissant. . . . .	60
2.22	Données expérimentales du défaut du bypass en petit débit : non-activation du volet et débit constant. . . . .	61
2.23	Données expérimentales pour l'obstruction du volet du bypass à grande vitesse. . . . .	62
2.24	Données expérimentales en fonctionnement nominal sans batterie antigel à petite vitesse. . . . .	63
2.25	Données expérimentales en fonctionnement nominal avec batterie antigel à petite vitesse. . . . .	64
2.26	Données expérimentales en fonctionnement pseudo-nominal avec batterie antigel mal régulée à petite vitesse. . . . .	65
2.27	Données expérimentales avec panne de la batterie antigel à petite vitesse. . . . .	66
2.28	Jeu de données expérimentales avec panne de la batterie antigel avec régulation défaillante à petite vitesse. . . . .	67
2.29	Données expérimentales avec panne de la batterie d'appoint, sans fonctionnement de batterie antigel à petite vitesse. . . . .	68
2.30	Données expérimentales avec panne de la batterie d'appoint, avec fonctionnement de batterie antigel à petite vitesse. . . . .	69
2.31	Schema de l'échangeur et de son bypass en position fermé (a) et ouvert (b) . . . . .	70
3.1	Exemple de variété. . . . .	76
3.2	Exemple de réductions de dimension repris de [1]. . . . .	77
3.3	Volume de conservation des distances autour du points pour 3 voisins (a) et 5 voisins (b). . . . .	78
3.4	Globe terrestre, faux voisinage. . . . .	79
3.5	Globe terrestre, déchirement. . . . .	79
3.6	Distances entre le point a et b. . . . .	81
3.7	Résultats expérimentaux de la méthode MDS (a) et RankVisu (b). . . . .	83
3.8	Résultats expérimentaux de la méthode t-SNE (a) et ASKI (b). . . . .	83
3.9	Fondements de l'outil de FDD. . . . .	84
3.10	Principe d'utilisation de l'outil de FDD. . . . .	85
3.11	Procédure générale de l'outil de FDD. . . . .	86
3.12	Détail de la Phase de <i>Pré-traitement</i> . . . . .	89
3.13	Représentation de l'indice de sévérité (SI). . . . .	92
3.14	5 premières sélections selon la méthode HASTI sur 100 points aléatoires. . . . .	93
3.15	Évolution des dimensions des matrices durant la méthodologie de l'outil. . . . .	94
3.16	Influence du nombre de voisins conservés cas avec 4 voisins (a) et 64 voisins (b). . . . .	95
3.17	Illustration d'une projection effectué par la méthode RBF. . . . .	97
3.18	Insertion de la méthode dans une mission de ICx. . . . .	98
3.19	Insertion de la méthode dans une mission de CCx. . . . .	99
4.1	Méthodologie d'évaluation de l'outil de FDD pour le cas d'un commissionnement initial. . . . .	107
4.2	Modèle 3D du bâtiment dans son environnement. . . . .	108
4.3	Plan de masse du bâtiment. . . . .	109
4.4	Schémas de la CTA en représentation OpenStudio (a), EnergyPlus (b) et schéma de principe. . . . .	110
4.5	Arbre des défauts numériques réalisés durant la saison d'été (a) et d'hiver (b). . . . .	112
4.6	Carte initiale d'hiver obtenue par la méthode de réduction de dimension. . . . .	120
4.7	Carte d'intensité des défauts d'hiver. . . . .	121
4.8	Carte des défauts uniques d'hiver. . . . .	122

4.9	Carte des défauts Globaux d'hiver. . . . .	123
4.10	Carte initiale d'été obtenue par la méthode de réduction de dimension. . . . .	123
4.11	Carte d'intensité des défauts d'été. . . . .	124
4.12	Carte des défauts uniques d'été. . . . .	124
4.13	Carte des défauts Globaux d'été. . . . .	125
4.14	Carte Finale de la saison d'hiver. . . . .	126
4.15	Carte Finale de la saison d'été. . . . .	127
4.16	Indice de sévérité de la panne du ventilateur de soufflage pour les données expérimentales en hiver (a) et été (b). . . . .	128
4.17	Indice de sévérité de la panne du ventilateur d'extraction pour les données expérimentales en hiver (a) et été (b). . . . .	128
4.18	Indice de sévérité de la rupture de courroie du ventilateur d'extraction pour les données expérimentales en hiver (a) et été (b). . . . .	129
4.19	Indice de sévérité pour les données expérimentales de la panne de la batterie anti-gel (a) et d'appoint (b). . . . .	130
4.20	Indice de sévérité pour les données expérimentales du défaut de régulation du bypass n° 1(a), n° 2 (b) et n° 3 (c). . . . .	131
4.21	Projection des points expérimentaux de la panne du ventilateur de soufflage sur la carte d'hiver (a) et d'été (b). . . . .	132
4.22	Projection des points expérimentaux de la panne du ventilateur d'extraction sur la carte d'hiver (a) et d'été (b). . . . .	132
4.23	Projection des points expérimentaux d'une rupture de courroie sur la carte d'hiver (a) et d'été (b). . . . .	133
4.24	Projection des points expérimentaux d'une panne de la batterie antigel (a) et d'appoint (b). . . . .	134
4.25	Projection des points expérimentaux de défaut de régulation du bypann n° 1 (a) et n°2 (b). . . . .	135
4.26	Projection des points expérimentaux de défaut de régulation du bypann n° 3. . . . .	136
5.1	Méthodologie d'évaluation de l'outil de FDD pour le cas d'un commissionnement sur bâtiments existants. . . . .	140
5.2	Hiérarchie des sources d'information. . . . .	142
5.3	Plan de masse du site. . . . .	144
5.4	Schémas simplifié des installations. . . . .	144
5.5	Densité de probabilité des températures pour l'année 2013 (a) et 2014 (b). . . . .	145
5.6	Évolution des températures de soufflage et intérieure dans le bâtiment. . . . .	146
5.7	Carte initiale d'hiver du cas sur bâtiment existant obtenue par la méthode de réduction de dimension. . . . .	151
5.8	Carte d'intensité des défauts d'hiver du cas de bâtiment existant. . . . .	152
5.9	Carte des défauts uniques d'hiver du cas de bâtiment existant. . . . .	153
5.10	Carte des défauts globaux d'hiver du cas de bâtiment existant. . . . .	154
5.11	Schéma de l'évolution des indices de sévérité dans les zones <i>inter-défauts</i> . . . . .	154
5.12	Carte initiale d'été du cas sur bâtiment existant obtenue par la méthode de réduction de dimension. . . . .	155
5.13	Carte d'intensité des défauts d'été du cas de bâtiment existant. . . . .	156
5.14	Carte des défauts uniques d'été du cas de bâtiment existant. . . . .	156
5.15	Carte des défauts globaux d'été du cas de bâtiment existant. . . . .	157
5.16	Carte finale de la saison d'hiver du cas de bâtiment existant. . . . .	158
5.17	Carte finale de la saison d'été du cas de bâtiment existant. . . . .	158
5.18	Évolution des indices de sévérité des défauts n°1 et 2. . . . .	159

5.19	Évolution des températures intérieure et de soufflage ( <i>a</i> ) lors de la première et ( <i>b</i> ) seconde année. . . . .	160
5.20	Projection de défaut de sous chauffe. . . . .	161
5.21	Indicateur de sévérité du défaut de sur-chauffe. . . . .	162
5.22	Projection de défaut de sur-chauffe. . . . .	163
5.23	Indicateur de sévérité du défaut de chute de rendement. . . . .	163
5.24	Projection de défaut de chute du rendement de l'échangeur. . . . .	164
5.25	Indicateur de sévérité du défaut de chute de rendement. . . . .	164
5.26	Projection de défaut de chute du rendement de l'échangeur. . . . .	165
5.27	Indicateur de sévérité du défaut de panne de la batterie antigel. . . . .	165
5.28	Projection de défaut de panne de la batterie antigel. . . . .	166
5.29	Indicateurs de sévérité des défaut de sur chauffe (2) et de la batterie (4). . . . .	166
5.30	Projection des défauts couplés de sur chauffe et de batterie. . . . .	167
5.31	Indicateurs de sévérité du défaut d'allumage de la batterie. . . . .	168
5.32	Projection du défaut d'allumage de la batterie. . . . .	168
5.33	Indicateurs de sévérité du défaut du problème de bypass. . . . .	169
5.34	Projection du défaut du problème de bypass. . . . .	169
5.35	Indicateurs de sévérité du problème de capteur. . . . .	170
5.36	Projection du problème de capteur. . . . .	170
5.37	Indicateurs de sévérité des défaut $n^{\circ}1$ et $n^{\circ}2$ . . . . .	171
5.38	Projection du défauts couplés de d'allumage de la batterie et de bypass. . . . .	171
A.1	Points de fonctionnement du ventilateur. . . . .	XXIII
A.2	Évolution des débits sur la gaine de soufflage ( <i>a</i> ) et de l'efficacité de l'échangeur ( <i>b</i> ) en fonction de l'encrassement. . . . .	XXV
B.1	Exemple des niveaux hiérarchiques dans l'organisation des dossiers. . . . .	XXVII
B.2	Exemple de données. . . . .	XXIX
B.3	Schéma de principe du système. . . . .	XXIX
D.1	Encrassement du filtre, sur la base de la Figure 2.7. . . . .	XLI
D.2	Données numériques de la panne du ventilateur de soufflage. . . . .	XLIII
D.3	Données numériques de la panne du ventilateur d'extraction. . . . .	XLIV
D.4	Données numériques de la panne totale des équipements. . . . .	XLV
D.5	Données numériques de la panne des deux ventilateurs. . . . .	XLV
D.6	Données numériques du défaut d'encrassement. . . . .	XLVI
D.7	Données numériques de la rupture de courroie du ventilateur d'extraction. . . . .	XLVI
D.8	Données numériques de la panne de la batterie antigel. . . . .	XLVII
D.9	Données numériques de la panne de la batterie d'appoint. . . . .	XLVII
D.10	Données numériques du défaut de régulation de la batterie antigel. . . . .	XLVIII
D.11	Données numériques du défaut de régulation de la batterie d'appoint. . . . .	XLIX
D.12	Données numériques du défaut de dérivation de capteur. . . . .	XLIX
D.13	Données numériques du défaut régulation du bypass ( <i>i</i> ). . . . .	L
D.14	Données numériques du défaut régulation du bypass ( <i>ii</i> ). . . . .	L
D.15	Données numériques du défaut régulation du bypass ( <i>iii</i> ). . . . .	LI



# Liste des tableaux

2.1	Synthèse des quantités mesurées et de leurs incertitudes. . . . .	45
2.2	Synthèse des défauts étudiés. . . . .	46
3.1	Logiciels de SED. . . . .	102
4.1	Défauts d’hiver et leurs règles. . . . .	113
4.2	Défauts d’été et leurs règles. . . . .	117
5.1	Défauts d’hiver du cas de Ccx et leurs règles. . . . .	149
5.2	Défauts d’été du cas de Ccx et leurs règles. . . . .	151
A.1	Tableau des distributions des particules extérieures et à la sortie du générateur. . .	XXV
A.2	Tableau des pesées du filtre. . . . .	XXV
B.1	Synthèse des indices des défauts d’hiver. . . . .	XXVIII
B.2	Description of each indexes of the files name. . . . .	XXX
C.1	Tableau de synthèse de la modélisation de défauts. . . . .	XXXIV



# Liste des symboles

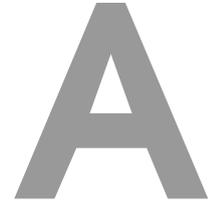
<i>AFDD</i>	Automated Fault Detection and Diagnosis ou Détection de Défauts et Diagnostics Automatisé en Français
<i>AHRI</i>	Air conditioning, Heating and Refrigeration Institute
<i>ASHRAE</i>	American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers
<i>BEPOS</i>	Bâtiment à Énergie Positive
<i>BREEAM</i>	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
<i>CCTP</i>	Cahier des Clauses Techniques Particulières
<i>CCx</i>	Continuous Commissioning ou Commissionnement Continu en Français
<i>COP</i>	Conference Of Parties où Conférence des États Signataires en Français
<i>CPE</i>	Contrat de Performance Énergétique
<i>CTA</i>	Centrale de Traitement de l'Air
<i>CVC</i>	Chauffage Ventilation et Climatisation équivalent de HVAC
<i>Cx</i>	Commissioning ou Commissionnement en Français
<i>DAV</i>	Débit d'Air Variable
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung ou Institut Allemand de Normalisation en Français
<i>EMS</i>	Energy Management System équivalent GTB
<i>EPBD</i>	Energy Performance of Building Directive où Directive sur la Performance Énergétique des Bâtiments en Français
<i>EPP</i>	Exigences du propriétaire
<i>EPW</i>	EnergyPlus Weather file
<i>EXE</i>	Exécution
<i>FDD</i>	Fault Detection and Diagnosis ou Détection de Défauts et Diagnostics en Français
<i>GES</i>	Gaz à Effet de Serre
<i>GTB</i>	Gestion Technique des Bâtiments équivalent EMS
<i>HQE</i>	Haute Qualité Environnementale
<i>HVAC</i>	Heating Ventilation and Air Conditioning équivalent de CVC en Français
<i>ICx</i>	Initial Commissioning ou Commissionnement Initial en Français
<i>INSEE</i>	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization ou Organisation Internationale de la Normalisation
<i>IWEC</i>	International Weather for Energy Calculations

## Abreviation

---

<i>LEED</i>	Leadership in Energy and Environmental Design
<i>MCE</i>	Mesure de Conservation d'Énergie
<i>MNIST</i>	Mixed National Institute of Standards Technology
<i>MOA</i>	Maîtrise d'Ouvrage
<i>MOE</i>	Maîtrise d'Oeuvre
<i>NIST</i>	National Institute of Science and Technology
<i>NREL</i>	National Renewable Energy Laboratory
<i>NZEB</i>	Near Zero Energy Building ou Bâtiment à Quasi Zero Énergie
<i>OM</i>	Operation and Maintenance ou Exploitation et Maintenance en Français
<i>OS</i>	OpenStudio
<i>PID</i>	Proportionnelle Intégrale Dérivée
<i>RCx</i>	Re-Commissioning ou Re-Commissionnement en Français
<i>RE</i>	Réglementation Énergétique
<i>RetroCx</i>	Retro-Commissioning ou Retro-Commissionnement en Français
<i>RSDT</i>	Règlement Sanitaire Départemental Type
<i>RT</i>	Réglementation Thermique
<i>SED</i>	Simulation Énergétique Dynamique
<i>STD</i>	Simulation Thermique Dynamique





## Annexe 1 : Protocole d'encrassement des filtres par génération de particules

---

*Dans cette Annexe est présenté le second protocole expérimental utilisé afin de générer des données de fonctionnement d'un système de ventilation encrassé. Ce protocole expérimental repose sur la génération et l'introduction de particules dans les conduites du système de ventilation.*

---

## A.1 Objectif

Lors de la génération des données expérimentales de systèmes comportant des défauts, un protocole expérimental a été mis en place pour la création des données avec filtres encrassés. Ce protocole initial consiste en l'obstruction croissante de la surface du filtre à l'aide de bandes adhésives. Cette obstruction entraîne une augmentation des pertes de charge du réseau et donc une diminution du débit, comme illustré sur la Figure A.1, présenté dans le Chapitre 2.

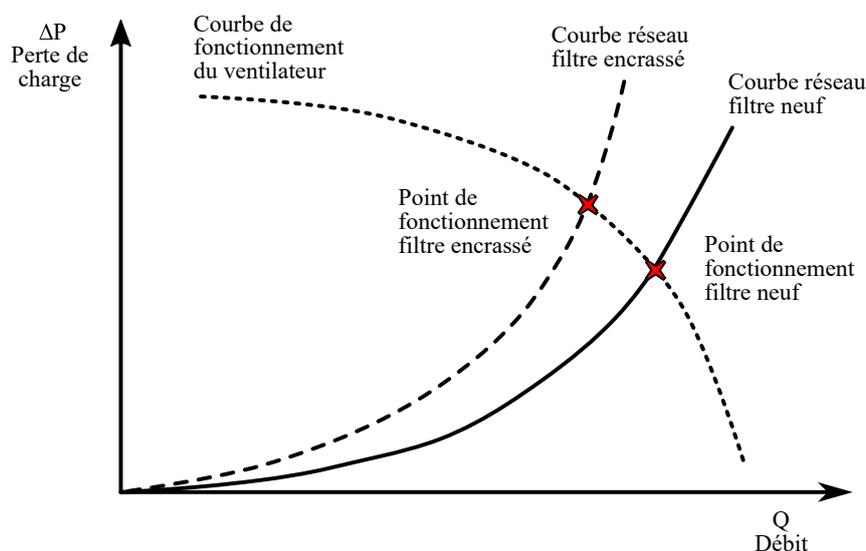


Figure A.1 – Points de fonctionnement du ventilateur.

Lors de la génération des tests pour le défaut d'encrassement des filtres en période hivernale, un second protocole a été ajouté à l'initial. Le second protocole permet de valider le premier en mettant en évidence des résultats similaires. Cette validation est nécessaire dans le sens où physiquement des phénomènes différents se produisent durant un encrassement réel et une obstruction. Durant un encrassement des particules sont déposées sur le filtre plissé de façon relativement uniforme. En revanche lors d'une obstruction, une surface localisée est recouverte, limitant le passage de l'air. Ces deux actions, bien qu'elles produisent toutes deux une augmentation des pertes de charge et une diminution du débit, induisent des comportements internes au filtre extrêmement différents. C'est le cas par exemple, au niveau du champ de vitesse, comme indiqué au Chapitre 2. Le second protocole, permet donc de réaliser l'encrassement d'un filtre au moyen de la génération de particules et non plus de le simuler à l'aide d'une obstruction. Ce second protocole a également pour but d'estimer les temps d'encrassement moyens équivalents aux surfaces d'obstruction du filtre utilisées pour simuler l'encrassement. En effet, en déterminant une concentration extérieure moyenne de particules, il peut être établi un parallèle entre la quantité massique de ces particules déposées sur le filtre et le temps qu'il faudrait selon certaines conditions de fonctionnement pour atteindre cet encrassement.

## A.2 Matériels et méthodes

Lors de ce protocole d'encrassement de filtre, le système de ventilation utilisé est le même que celui présenté dans le Chapitre 2. La génération particulaire servant à effectuer l'encrassement est réalisée via un séparateur de particules de type *cyclone* où se trouve de la poudre d'émeri

(pouldolite) constituée de  $PM_{10}$ . Un débit d'air est injecté dans le séparateur via le réseau d'air comprimé. Un détendeur, une vanne ainsi qu'un débitmètre sont installés sur le réseau d'air en amont du séparateur de particules. Un débit contrôlé de  $501.m^{-3}$  est alors injecté dans le séparateur de particules. Ce débit d'air traverse alors un lit de silice, déposé dans un réacteur, induisant la fluidisation de ce lit et la génération d'une quantité de particules. Ces particules sont par la suite injectées directement à l'entrée de l'orifice d'aspiration du système de ventilation (la gaine d'air neuf), permettant alors l'encrassement du filtre. Les concentrations injectées dans la gaine sont mesurées à titre indicatif avec un compteur de particules de type *Met One HHPC 6+* de chez *Beckman coulter*. Ces compteurs permettent d'obtenir des concentrations pour différents diamètres aérauliques. Ces mesures allant de  $0.3$  à  $10 \mu m.l^{-1}$ , avec une précision de  $50\%$  à  $0.3 \mu m$  et de  $100\%$  à partir de  $0.45 \mu m$ , selon la norme ISO 21501. Les mesures de masse sont réalisées avec une balance de précision *PCB* du fabricant *Kern* possédant d'après le constructeur une précision de mesure de  $0.001 g$ . Les résultats des mesures de masses fournis par la suite sont une moyenne de dix mesures réalisées.

Pour générer les jeux de données issus du second protocole d'encrassement, deux phases sont réalisées. Tout d'abord le filtre est encrassé en respectant le nouveau protocole, puis ensuite la mesure correspondant à cet encrassement est réalisée.

Afin de réaliser l'encrassement de ce filtre, plusieurs étapes sont nécessaires. Tout d'abord, la concentration extérieure moyenne est mesurée afin d'être comme référence pour l'estimation des durées d'encrassement. Cette mesure est effectuée par un prélèvement continu sur un litre d'air. Le résultat fourni correspond à la distribution des concentrations mesurées sur les diamètres aérauliques de  $0.3 \mu m$ ,  $0.5 \mu m$ ,  $1 \mu m$ ,  $2 \mu m$ ,  $5 \mu m$  et  $10 \mu m$ . Ensuite, la génération de particules à la sortie du séparateur est mesurée afin de connaître la quantité introduite dans le système. Les filtres neufs sont pesés avant les tests d'encrassement afin de connaître leur masse initiale. Puis, le filtre est replacé dans la CTA et il est encrassé au moyen du générateur de particules. L'échappement du générateur est placé à l'entrée de la gaine d'air neuf de la CTA, permettant l'introduction des particules dans le système. Après la période d'encrassement, le filtre est pesé une seconde fois pour connaître la quantité de particules filtrées. Le filtre est alors replacé dans la CTA, le protocole d'encrassement est terminé et la mesure pour générer le jeu de données peut être lancée. Durant l'enregistrement pour le jeu de données, la génération est stoppée et le système opère en fonctionnement normal.

Une fois le jeu de données enregistré, les étapes du protocole d'encrassement peuvent être répétées.

### A.3 Résultats

Les résultats obtenus avec ce protocole sont présentés dans cette section.

Les concentrations extérieures comme celles produites à la sortie du générateur sont mesurées à plusieurs reprises puis sont moyennées. Leurs distributions sont présentées dans le Tableau A.1. On constate alors que la concentration à la sortie du générateur est sur l'intégralité des diamètres en moyenne  $2263.01$  fois supérieure à la concentration extérieure mesurée. Ainsi, l'injection de cette concentration durant une heure dans la CTA correspond au passage de la même quantité de particules que lors d'approximativement  $2263 h$  de fonctionnement avec de l'air extérieur.

Trois pesées de filtre ont été effectuées durant cette génération. La première est celle du filtre neuf, avant toute pollution, correspondant à la mesure à  $0 h$  de colmatage. Puis deux autres pesées ont été faites à l'issue de  $3 h$  et  $7 h$  de colmatage. Ces deux mesures correspondent donc à la

Tableau A.1 – Tableau des distributions des particules extérieures et à la sortie du générateur.

Diamètre aéroulique $\Phi$	Concentration extérieure moyenne $C_{ext}$	Concentration moyenne sortie générateur $C_{gen}$	Ratio $\frac{C_{gen}}{C_{ext}}$
0.3 $\mu\text{m}$	22153	66527	3
0.5 $\mu\text{m}$	2246	23043	10.26
1 $\mu\text{m}$	376	11003	29.26
2 $\mu\text{m}$	211	14981	71
5 $\mu\text{m}$	6	9698	1616.33
10 $\mu\text{m}$	1	11849	11849

quantité de particules qui pourrait être filtrée à l'issue d'un fonctionnement d'approximativement 9 mois et 22 mois avec les conditions extérieures mesurées et les débits mis en œuvre (débit de  $130\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ ). Ces deux périodes d'encrassement entraînent les colmatages des filtres présentés dans le Tableau A.2. Ces derniers entraînent une perte de charge dans les réseaux faisant diminuer les débits de façon similaire aux obstructions de 30% et de 40% de la surface du filtre selon le premier protocole.

Ces données sont projetées sur celles obtenues avec le protocole précédent, comme sur la Figure A.2. Les résultats du protocole expérimental initial sont donc validés et les chutes de débit obtenues peuvent être grossièrement reliées à des durées de fonctionnement.

Tableau A.2 – Tableau des pesées du filtre.

Durée d'encrassement h	Résultat de la pesée $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
0 h	550.56
3 h	551.42
7 h	551.77

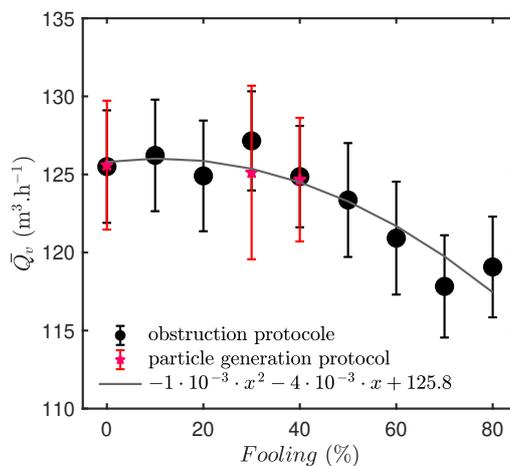


Figure A.2 – Évolution des débits sur la gaine de soufflage (a) et de l'efficacité de l'échangeur (b) en fonction de l'encrassement.

# B

## Annexe 2 : Exemple d'organisation de la base de données

---

*Dans cette Annexe une proposition d'organisation de la base données du référentiel est présentée.*

---

Ce type de base de données de référence est conséquente pour pouvoir être le plus utile possible. Afin de permettre que son utilisation soit la plus simple possible, il convient que ces données soient organisées de façon logique et pratique. Dans cette Annexe, un type d'organisation est proposé pour permettre d'illustrer et de comprendre la structuration de ce type de référentiel.

## B.1 Organisation de la base de données

### B.1.1 L'organisation des dossiers - L'arborescence

Dans l'optique de simplifier l'utilisation de ce type de base de données, nous proposons de fournir les données sous une structuration en arborescence. Ainsi, les données seront classées dans une série de dossiers permettant de trouver facilement le jeu de données souhaité. Les dossiers doivent être organisés en plusieurs niveaux hiérarchiques comme présentés dans la Figure B.1. Le premier niveau de l'arborescence correspond aux différents modes de fonctionnement du système. Par exemple concernant le système étudié au Chapitre 2, ces modes de fonctionnement sont ceux de l'été et de l'hiver. Le second niveau hiérarchique doit correspondre aux équipements pouvant subir des défauts comme par exemple les ventilateurs, les filtres... Le troisième niveau concerne le défaut ou son absence (fonctionnement nominal). Le dernier niveau correspond au régime de fonctionnement du système, dans l'exemple du Chapitre 2 cela correspond aux différents débits. Des niveaux supplémentaires peuvent être ajoutés en fonction des besoins et de la complexité des jeux de données. Grâce à cette organisation, la recherche des données est relativement simple et intuitive.

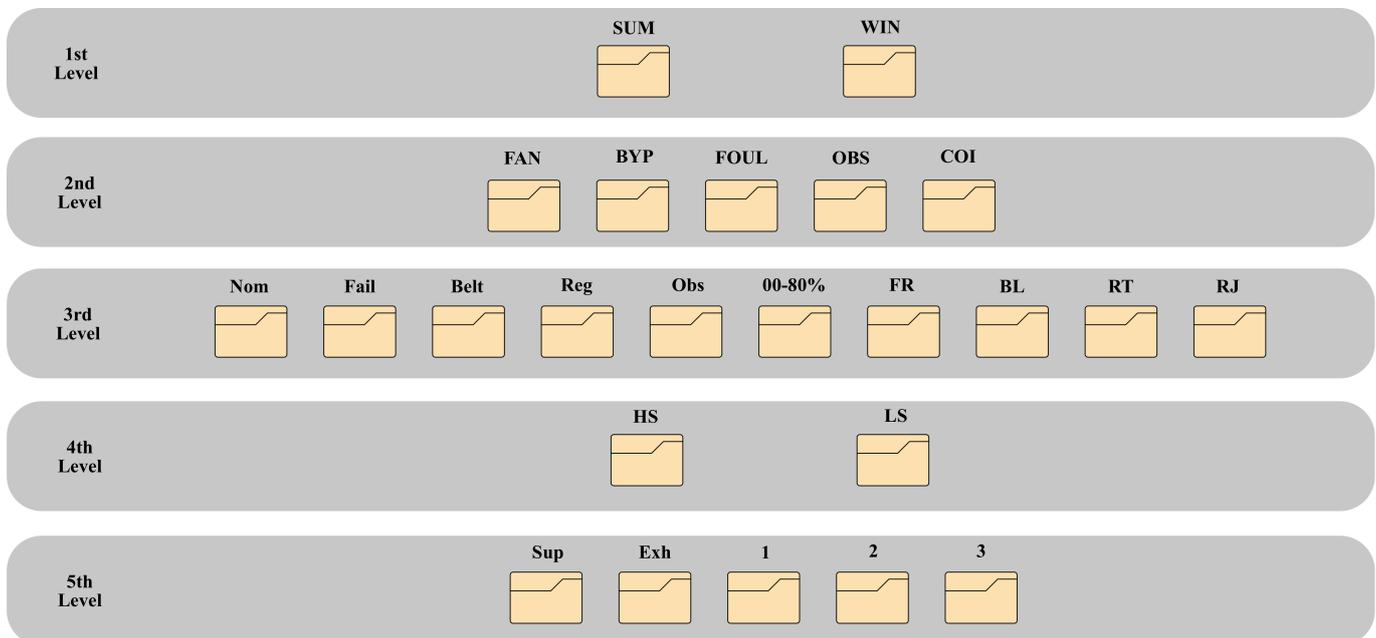


Figure B.1 – Exemple des niveaux hiérarchiques dans l'organisation des dossiers.

### B.1.2 L'organisation des fichiers

Les fichiers doivent être fournis au format ASCII.txt afin de pouvoir être facilement utilisés par l'ensemble des utilisateurs souhaitant tester des méthodes de détection de défauts. Dans un

souci de clarté, les données sont référencées d'après leur classement dans l'arborescence. Le nom d'un jeu de données est composé d'une suite d'indices de trois ou quatre lettres, correspondant à sa ramification dans l'arbre de classification. Ainsi le nom du jeu de données permet de connaître l'intégralité des informations importantes du jeu. Le premier indice correspond au type de fonctionnement, il permet de déterminer dans quelle circonstance de fonctionnement le défaut peut se produire. Le second indice porte sur l'élément du système sur lequel peut apparaître le défaut. Le troisième indice correspond au type de défaut (ou d'absence de défaut) apparaissant. Le quatrième indice concerne le régime de fonctionnement du système (les débits pour le cas du Chapitre 2). Un cinquième indice peut être ajouté pour apporter des précisions sur les données comme par exemple sur la conduite dans laquelle se produit le défaut.

Une synthèse de ces indices définissant les défauts doit être effectuée et fournie ainsi qu'une description de ces derniers. Les Tableaux B.1 et B.2 présentent respectivement la synthèse des indices et la description des indices des défauts d'hiver devant être insérés dans la base de données.

Tableau B.1 – Synthèse des indices des défauts d'hiver.

Operation type	Equipment	Fault type	Fan speed	precision
WIN	FAN	Fail	HS	Sup
		Belt	LS	Exh
		Nom		
	BYP	Reg	HS	1,2,3
Obs		LS		
Nom				
FOU		00, 10, 20,	HS	Sup
		30, 40, 50,	LS	Exh
		60, 70, 80		
OBS		FR	HS	
		BL		
		RT		
		RJ		

### B.1.3 L'organisation des données

Concernant l'organisation des données dans les fichiers, elle doit être uniforme pour l'intégralité de la base de données. Chaque fichier de données doit comporter l'intégralité des mesures effectuées, même si certaines d'entre elles n'ont pas d'utilité au regard du cas étudié. Les données sont présentées sous une matrice, la Figure B.2 présente un exemple d'un jeu de données obtenu au Chapitre 2. Dans un souci de compacité, seuls les trois premiers pas de temps y sont présentés. Les différentes variables sont renseignées en colonne et les pas de temps en ligne. La première ligne de cette matrice correspond aux informations sur les variables qui seront présentées. Un document récapitulatif doit être joint afin d'expliquer l'organisation des données et de rappeler des unités des variables. Un schéma de principe du système étudié doit également être fourni. Ce type de schéma, présenté en Figure B.3 doit permettre d'identifier où sont localisés les différents points de mesure.

t	dp_Sup	dp_Exh	Qv_Sup	Qv_Exh	T_Sup	T_Out	T_Pre	T_Hex	T_Exh	T_Ret	P_Sup	P_Exh	P_Byp
0,000	6,344	6,144	125,076	123,063	34,063	38,012	38,075	34,641	36,865	32,678	40,937	41,196	0,000
0,083	6,295	6,207	124,569	123,684	34,093	37,972	38,036	34,655	36,887	32,686	40,937	41,198	0,000
0,167	6,317	6,214	124,793	123,745	34,090	38,261	38,144	34,648	36,879	32,666	40,937	41,199	0,000

Figure B.2 – Exemple de données.

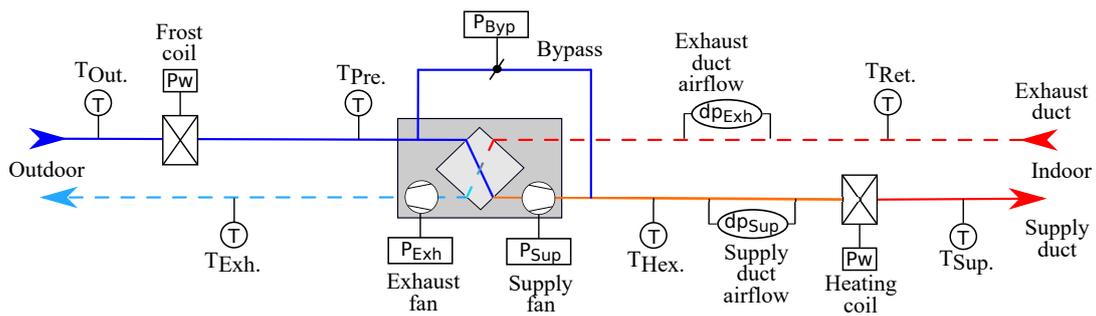
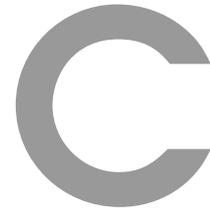


Figure B.3 – Schéma de principe du système.

Tableau B.2 – Description of each indexes of the files name.

Index location	Indexes	Description
1	<i>WIN</i>	Winter operation
	<i>SUM</i>	Summer operation
2	<i>FAN</i>	Fan fault category
	<i>BYP</i>	Bypass fault category
	<i>FOU</i>	Filter fouling fault category
	<i>OBS</i>	Branch obstruction fault category
3	<i>Fail</i>	Fan failure fault
	<i>Belt</i>	Fan belt breakdown fault
	<i>Reg</i>	Bypass regulation fault
	<i>Obs</i>	Bypass obstruction fault
	<i>Nom</i>	Nominal operation
	00 to 80	Percentage of filter fooling
	<i>FR</i>	Fresh air branch
	<i>BL</i>	Blow air branch
	<i>RT</i>	Return air branch
	<i>RJ</i>	Rejected air branch
4	<i>HS</i>	High speed
	<i>LS</i>	Low speed
5	<i>Sup</i>	Supply air duct
	<i>Exh</i>	Exhaust air duct
	1	The bypass is activated but the airflow did not increase (LS)
		The bypass is activated but the airflow is reduced (HS)
	2	The bypass is not activated and the airflow is increased (LS)
		The bypass is not activated and the airflow is decreased (HS)
3	The bypass is not activated and the airflow did not increased (LS)	
	The bypass is not activated and the airflow did not decreased (HS)	



## Annexe 3 : Travail d'analyse de la littérature sur la modélisation des défauts

---

*Dans cette Annexe est présenté un travail d'analyse de la littérature concernant la modélisation de défauts dans les systèmes énergétiques. Ce travail cherche à mettre en évidence le logiciel le plus approprié dans le cas d'une étude de l'efficacité d'un outil de détection de défauts.*

---

## C.1 Les logiciels

Aujourd'hui, la modélisation de défauts dans les systèmes énergétiques du bâtiment reste l'un des enjeux principaux du secteur de la SED et cela malgré l'existence de plus de 170 logiciels disponibles dans le secteur du génie énergétique [74]. Dans cette section, les avantages et inconvénients des principaux logiciels de modélisation permettant la génération de défauts seront analysés afin de permettre de choisir le logiciel le plus approprié.

Le logiciel HVACSIM+ développé par le NIST a souvent été utilisé pour modéliser des défauts dans les systèmes énergétiques du bâtiment et particulièrement dans le cas de systèmes de ventilation. Le projet ASHRAE RP-1312 [111, 112, 178] s'est attaché à développer plusieurs modèles de fautes sur des systèmes de type CTA avec le logiciel HVACSIM+. Les données de fonctionnement défaillant ont ensuite été validées avec des données de systèmes identiques *in situ*. Pour finir les données ont été rassemblées dans un jeu de données payant. Lors de ces travaux [145–147], il a été développé des modèles de défauts pour ventilo-convecteur, système *tout air* à double gaine (peu utilisé en France) et un système à DAV (Débit d'air variable) sur le logiciel HVACSIM+ qui ont été fournis en librairie du logiciel. Un total d'une vingtaine de défauts différents de type *soft faults*, *hard faults* et même *control faults* à été créé. Ces défauts portant aussi bien sur les composants du système que sur les organes de régulation ou même la boucle de contrôle sont modélisés par changement de paramètres d'entrée existants et par traitement explicite. Ces défauts ont ensuite été validés par comparaison avec une simulation sans défaut, avec des données réelles ou expérimentales. Le NIST a également effectué des travaux à partir des données de fonctionnement de systèmes à débit variable défaillants. Ceux-ci sont modélisés sur HVACSIM+ avec pour objectif final la création d'un environnement de test des outils de FDD [16].

Le logiciel DOE-2 créé par le département de l'énergie Américain, ne possède lui en revanche que très peu de cas d'étude de génération de données de systèmes avec défauts. Une publication de KATIPAMULA [97] utilise en partie des données générées afin de tester un outils de FDD applicable aux économiseurs d'énergie des CTA. Les défauts modélisés dans cet article sont ceux qui ont été jugés les plus courants parmi les 25 défauts potentiels identifiés dans le fonctionnement d'un économiseur sur l'air extérieur : dérive du capteur d'air extérieur (d'environ 5°C); le volet d'air bloqué en position ouvert; le volet d'air bloqué en position fermé; le volet d'air bloqué en position intermédiaire; et le volet d'air bloqué en position souhaitée. Leurs modélisations ont été effectuées par la méthode de la manipulation des données d'entrée.

Le logiciel TRNSYS développé par l'Université du Wisconsin permet également la modélisation de quelques défauts. Les travaux de KHIRE [99] ont permis de montrer la possibilité de générer des comportements défaillants des systèmes avec TRNSYS en développant une librairie de modèles de défauts utilisable par tous. Les défauts de cette librairie concernent les économiseurs d'air extérieur, les batteries, les ventilateurs et pompes, les chaudières, les plénums et la régulation. Les défauts ont été simulés avec des couplages afin d'étudier l'effet sur les performances totales du système, qui ont été fortement impactées.

Modelica qui est considéré ici comme un logiciel de modélisation de systèmes énergétiques relève en fait plutôt du langage de programmation. Plusieurs travaux ont été réalisés sur cet environnement de travail afin de tester des algorithmes de FDD sur des systèmes de ventilation. Une CTA est modélisée en fonctionnement nominal et avec trois défauts uniques que sont la défaillance de la vanne de la batterie chaude, celle de la batterie froide, et le volet d'air du caisson de mixage [158]. Ces défauts sont modélisés par la méthode de modification de paramètres d'entrée. Des défaillances de capteurs (dérives) ont également été modélisées sur un DAV avec Modelica (et ajoutées dans une librairie) dans le but de tester une méthode de FDD [134]. D'autres modèles de défauts de CTA ont également été modélisés avec les méthodes de modification des entrées ou l'ajout de modèles physiques [5, 133, 137, 159]. Des données de systèmes défaillants (dérive de capteur de température et vanne bloquée) ont aussi été modélisées dans une co-simulation

EnergyPlus, Modelica dans un but d'évaluation de l'impact des défauts [20]. Matlab Simulink est exactement le même type d'environnement que Modelica et des travaux de modélisation de défauts ont également été développés par GLASS [10,63] pour des offsets de capteurs de température et des blocages de vannes et de volets.

Pour finir, EnergyPlus, logiciel de simulation énergétique globale du bâtiment, est également utilisé pour la modélisation de défauts dans les systèmes énergétiques. Les travaux de WANG [175] utilisent les possibilités d'EnergyPlus pour créer des modèles de bâtiments comportant des défauts initiaux. Sur ce modèle une méthode de CCx basée sur le suivi du bâtiment est utilisée. Ainsi, ils peuvent appliquer des mesures de conservation d'énergie et analyser les économies réalisées. Des travaux similaires ont été réalisés par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) [21], dans lesquels la qualité d'un logiciel d'audit a été testée. Dans cette étude des bâtiments avec et sans "perturbations" (qui correspondent à des défauts permettant la mise en place de mesures de conservation de l'énergie) ont été modélisés sur EnergyPlus. Ceci afin de tester l'outil "No Touch" qui met en évidence les bâtiments ayant un potentiel d'amélioration de performance énergétique. Dans ces deux études, les défauts ont donc été générés via une modification des paramètres d'entrée. De nombreux articles, dont l'objectif est de classer les défauts des systèmes selon leurs impacts sur les consommations ou le confort, utilisent les fonctionnalités d'EnergyPlus pour arriver à leur fin. C'est le cas d'un des articles du Lawrence Berkley National Laboratory (LBNL) [174], dont l'objectif est de regarder l'impact de défauts en fonction de différents types de maintenance. Dans cette étude, plusieurs défauts sur un système de ventilation de type DAV, ainsi que des défauts couplés, ont été réalisés selon les trois types de modélisation possibles. Des travaux récents donnent un cadre innovant d'analyse de l'impact sur le confort et les consommations d'énergie, des défauts et de leurs corrections [115]. Dans ce dernier, de nombreux défauts (environ 40) ont été modélisés sur EnergyPlus essentiellement par modification des paramètres d'entrée (une publication donnant plus en détail la modélisation des défauts est en cours d'écriture). ZHANG étudie également l'impact des défauts sur les performances du bâtiment et compare en même temps l'utilisation des trois types de modélisation des défauts [184, 185]. Le développement du cadre d'une méthode de modélisation de défauts sur EnergyPlus et OpenStudio pour l'obtention de *ground truth* a aussi été réalisé, avec l'étude de l'impact de trois défauts : un volet et un ventilateur défaillant ainsi qu'une batterie encrassée [113]. Des travaux en deux parties, couvrant le développement puis la validation de modèles de défauts sur EnergyPlus et OpenStudio ont été récemment publiés [100, 101]. Ils ont été développés pour entraîner les algorithmes d'AFDD à moindre coût et doivent conduire à l'élaboration de nouvelles bibliothèques sur OpenStudio.

Il ressort de l'analyse de ces publications, le même constat que celui obtenu dans d'autres travaux de comparaison [8, 168] ou de revue de l'état de l'art [114]. Que ce soit pour la modélisation de bâtiments ou des défauts, le logiciel EnergyPlus semble être le plus adapté. En effet, sa grande précision en matière de simulation des bâtiments en a fait un logiciel incontournable dans le domaine de la recherche mais également dans l'industrie (plus particulièrement aux USA).

De plus, EnergyPlus s'impose comme le logiciel ayant le plus de capacité pour la simulation de défauts, bien que les logiciels comme MatlabSimulink et Modelica soient plus flexibles pour le développement de modèles de défauts dynamiques basés sur des équations physiques. EnergyPlus possède des modèles de défauts *natifs*, c'est-à-dire déjà implémentés, mais laisse également la possibilité d'en créer de différentes manières. De surcroît, EnergyPlus se trouve être un logiciel fiable (dont l'utilisation est largement admise dans le secteur de la recherche), gratuit, ouvert et en libre accès, dont les développeurs continuent à travailler sur les modèles de défauts.

Pour toutes ces raisons il a été choisi d'utiliser EnergyPlus pour la modélisation des défauts dans le cadre de l'utilisation de l'outil de FDD en ICx.

Tableau C.1 – Tableau de synthèse de la modélisation de défauts.

Logiciel	Référence	Système
HVACSIM <sup>+</sup>	[111, 112, 178]	CTA
	[145, 146]	Ventilo-convecteur et
	[147]	Système à débit d'air variable
	[16]	Système à débit d'air variable
DOE-2	[97]	Économiseur de CTA
TRNSYS	[99]	CTA
Modelica	[158]	CTA
	[134]	Système à débit d'air variable
	[133, 137]	
	[159]	CTA
[5]		
Co-Simulation Modelica / EnergyPlus	[20]	Système à débit d'air variable
Matlab Simulink	[63]	CTA
	[10]	Système à débit d'air variable
EnergyPlus	[175]	CTA et Réseaux de chauffage
	[21]	Sur-dimensionnement des systèmes changement des consignes...
	[174]	Système à débit d'air variable
	[115]	Système à débit d'air variable et sur le confort intérieur
	[184, 185]	AHU
	[113]	AHU
[100, 101]	AHU, Conception, Sur-dimensionnement...	

## C.2 EnergyPlus

Dans cette section les possibilités de modélisation des défauts disponibles sur Energyplus vont être présentées. Avec ce logiciel, les défauts peuvent être modélisés selon les trois approches préalablement explicitées : (i) par la modification de valeurs de paramètres, (ii) par la création de modèles ou (iii) via l'utilisation de modèles de défauts natifs.

### C.2.1 Les type de contrôles

Afin de comprendre comment les défauts peuvent être modélisés, les différentes possibilités de contrôle permises par EnergyPlus vont être présentés. En effet, c'est en partie grâce à ces dernières que les défauts peuvent être simulés. Dans ce logiciel on peut différencier deux principaux types de contrôle, les contrôles standards et le contrôle EMS [48]. Dans EnergyPlus les contrôles

les plus complexes sont ceux appliqués aux HVAC.

En ce qui concerne les contrôles standards, ils peuvent être divisés en deux autres sous niveaux, les bas niveaux de contrôle et les hauts niveaux de contrôle. Les contrôles de bas niveaux sont souvent directement inclus dans les *objets* EnergyPlus. Les *objets* correspondent à un regroupement d'un certain nombre de champs servant à renseigner des données d'entrée. Ces données seront utilisées pour modéliser l'objet lui-même (e.g. un *Electric Equipment* ou des *Lights*). Parmi les contrôles de bas niveaux, certains sont donc directement gérés par des champs à renseigner. Ils peuvent par exemple prendre la forme des calendriers de fonctionnement, ou de puissance à fournir durant la simulation. Il existe également des *objets* qui sont des systèmes CVC standards déjà créés par EnergyPlus, qui se nomment les *HVAC Template*. Ces derniers incluent souvent des systèmes de contrôles internes, avec par exemple des températures de consigne, des bandes mortes, des seuils ... Ces systèmes de contrôle interne peuvent être relativement complexes et comprendre de nombreux champs à renseigner. Un groupe d'*objets* clés du contrôle est les *Zone Controls* constitués des *Thermostats*, *Humidistats* et *SetPoints* (il en existe 6 grandes catégories avec plusieurs variantes). Ils permettent de définir des variables de contrôle à certains endroits et d'imposer des valeurs de consigne. Pour finir, il existe un certain nombre d'*objets* élaborés uniquement pour des actions de contrôle spécifiques ce sont les *Controllers*. Ces derniers permettent de modifier certaines variables, d'après un comportement prédéfini, en fonction d'informations qui leur sont fournies pour atteindre des consignes. En revanche, ces *objets* ne peuvent pas outrepasser les valeurs de consigne ou limites fixées. EnergyPlus définit 5 types de *Controllers* différents.

Les contrôles standards d'EnergyPlus comprennent également les contrôles de hauts niveaux. Ce mode de contrôle est plus complexe. Il est souvent utilisé pour des boucles de réseaux (partie d'un système) plus que pour les composants eux-mêmes, contrairement aux contrôles de bas niveaux. Ils sont appelés de haut niveau car ils se placent au-dessus des contrôles de bas niveau et peuvent donc surpasser leurs ordres de régulation pour assouvir un objectif spécifique de la boucle. Parmi les *objets* de contrôle de haut niveau on trouve par exemple les *Setpoint Managers*. Ces derniers permettent l'accès à certaines informations du système en n'importe quels points de celui-ci. Ces informations peuvent être utilisées pour modifier le comportement du système comme recalculer des valeurs de consigne [46]. Les informations du pas de temps précédent sont utilisées à chaque itération de calcul pour déterminer les nouvelles valeurs. EnergyPlus propose environ 30 *Setpoint Managers* différents. Les *System Availability Managers* sont également un autre groupe important de contrôle de haut niveau. Ils permettent l'accès aux informations comprises dans chacun des nœuds du système pour décider du comportement que doit adopter le système complet ou certains équipements. Il en existe une douzaine parmi lesquels on trouve par exemple le *Availability Manager : Night Cycle*. Cet *Availability Manager* permet de stopper les systèmes de ventilation la nuit pour des économies d'énergie mais de les rallumer sous certaines conditions (e.g. une montée ou chute en température trop importante). Il existe d'autres *objets* de contrôle de haut niveau comme les *Operation scheme* permettant d'effectuer la régulation des générateurs (e.g. cascades), ou les *Demand Manager* autorisant la programmation du délestage.

Tous les *objets* de contrôle de haut niveau (sauf le *Demand Manager*) voient leur routine effectuée à chaque itération de calcul, mais fonctionnent en contrôle décalé. C'est-à-dire qu'ils utilisent les valeurs du pas de temps précédent pour effectuer leurs actions.

Les contrôles dit standards fournis de façon native dans EnergyPlus permettent donc un grand nombre de régulations et de contrôles pour beaucoup de systèmes courants. En revanche, tous les contrôles ne sont pas possibles avec ces outils car certains n'ont pas été développés par les concepteurs et ceux existants ne sont pas directement modifiables. C'est pourquoi EnergyPlus a développé le module EMS qui permet de généraliser tous types de contrôle de haut niveau pour tous systèmes possibles.

Les contrôles EMS permettent de réaliser tout ce qui est possible avec les contrôles de bas

et de haut niveau. Ils offrent même une flexibilité supplémentaire car ils permettent d'avoir la main sur de nombreux paramètres fixes dans les contrôles standards. Ils généralisent les contrôles de haut niveau mais nécessitent souvent d'être couplés à des *objets* de bas niveau qu'ils peuvent modifier [43].

L'EMS est divisé en entrées de deux types les *objets Hardware* et les *objets Software*. Les *objets hardware* sont les éléments physiques (*e.g.* les capteurs, contacteurs, volets ...). Ils sont utilisés pour récupérer des informations et effectuer des variables. Les *objets software* sont plutôt les stratégies de contrôle. Ils servent à définir la localisation dans la structure code ainsi que la façon dont seront exécutés les programmes créés. Ils peuvent également permettre de pré-traiter des données. Ces deux éléments communiquent ensemble via l'ERL (EnergyPlus Runtime Language). L'ERL est un langage de programmation développé pour définir les algorithmes de contrôle. Il permet d'appeler des variables ou d'en générer, de créer des boucles, des règles logiques, d'effectuer des calculs, de générer aléatoirement des valeurs ... Cela permet de modifier les actions des éléments de contrôle (actionneur, vanne, consigne...) grâce aux valeurs récupérées (capteurs, compteurs ...) via les routines créées.

Les EMS sont exécutés à chaque pas de temps par EnergyPlus. Ce sont les stratégies de contrôle de plus haut niveau, elles écrasent donc les contrôles de niveaux inférieurs. En revanche en fonction de la localisation dans le code où l'EMS est appelé son action peut être inefficace. Elle est en mesure de surpasser les contrôles réalisés en amont pour fixer la valeur d'une variable. Cependant, si dans le code général d'EnergyPlus d'autres stratégies de contrôle sont exécutées après ces derniers pourront de nouveau modifier cette variable. Une attention particulière doit être portée à la manière dont le code EnergyPlus est ordonné. Ainsi les programmes EMS pourront être appelés dans le code pour qu'ils puissent modifier les variables de façon efficace.

## C.2.2 La modélisation des défauts

Ainsi comme présenté précédemment EnergyPlus possède de nombreuses fonctionnalités de contrôle. Ces dernières s'appliquent essentiellement sur les systèmes mais pas uniquement. Certaines d'entre-elles peuvent également être utilisées pour modifier des paramètres physiques du bâtiment (*e.g.* valeurs de conductivité, de réflectivité ...). Les trois approches de modélisation possibles vont être expliquées sous EnergyPlus.

### C.2.2.1 La modification des paramètres d'entrée.

EnergyPlus permet bien évidemment la génération de défauts via la modification de paramètres d'entrée. Des défauts peuvent être constants et donc être modélisés durant toute la simulation mais également apparaître au cours de cette dernière. Les défauts constants sont réalisés via la définition des paramètres induisant un état défectueux tout au long de la simulation. Les défauts survenant durant la modélisation sont effectués via la modification de paramètres d'un état nominal à défectueux. L'apparition de défauts durant la simulation peut être gérée via des emplois du temps, des types de contrôle permis par EnergyPlus et même par des EMS.

### C.2.2.2 La création de modèles.

La modélisation de défauts à l'aide de création de modèles est permise dans EnergyPlus. Elle peut être réalisée via des codes en ERL dans le module *Energy Management System*. Cela permet une relativement grande possibilité de contrôle des systèmes actifs (HVAC) comme passifs (*e.g.* mur trombe, vitrage photochromique). Toutefois, EnergyPlus n'offre pas les possibilités de création des langages de programmation (*i.e.* Matlab, Python ...). Le nombre de variables d'entrée (capteur) et de sortie (contrôle) est finie dans EnergyPlus. Leur nombre dépend des *objets* utilisés dans la modélisation.

### C.2.2.3 Les modèles natifs.

EnergyPlus possède un certain nombre de défaut natifs. Ils permettent de réaliser un certain nombre de défauts en ayant simplement quelques entrées et *objets* complémentaires à renseigner. Ces *objets* permettent de modéliser des défauts simples d'après leur comportement physique. Les équations physiques régissant ces modèles sont présentées dans la documentation technique [45]. Ils sont parfois réalisés via des EMS.

Ainsi il est clair qu'EnergyPlus offre de grandes possibilités tant en terme de contrôle des systèmes que de modélisation des défauts, ces deux types de modélisation étant étroitement liées. En revanche, il convient de nuancer cela. Bien que possible, la modélisation des défauts (essentiellement via la création de modèles et modèles natifs) s'avère relativement complexe. Elle demande une analyse détaillée des hypothèses de calcul et de l'organisation du code.

De plus, bien qu'EnergyPlus propose des possibilités de contrôle et de modélisation poussées, certaines fonctionnalités ne sont pas directement compatibles. Des problèmes dans le code EnergyPlus au niveau des contrôles de haut niveau ainsi que des modèles natifs de défauts ont également été relevés [127–132]. Ces éléments n'étant pas couramment utilisés leur défaillance est parfois détectée tardivement.



## Annexe 4 : Modélisation des défauts

---

*Cette Annexe présente comment sont modélisés les défauts utilisés dans le cadre de l'étude de l'efficacité de l'outil de FDD dans le cas d'un commissionnement initial. Ensuite les résultats de ces défauts sont présentés et analysés pour être validés et assurer un ground truth.*

---

## D.1 Les défauts

Dans cette section seront détaillés les défauts modélisés sur EnergyPlus et la façon dont ces défauts ont été générés. Ces défauts sont présentés selon les catégories définies dans le Chapitre 2 (*i.e.* globaux, d'été, d'hiver).

### D.1.1 Les défauts globaux

Les défauts globaux concernent des défauts qui sont susceptibles d'apparaître en saison estivale (plutôt climatisation) et hivernale (saison de chauffe). Ils ont donc été réalisés durant les deux modélisations. Les défauts globaux comprennent : (i) la panne du ventilateur d'extraction, (ii) la panne du ventilateur de soufflage, (iii) la panne totale des équipements, (iv) la panne simultanée des deux ventilateurs, et (v) l'encrassement du filtre.

#### D.1.1.1 Défaut du ventilateur d'extraction.

Le défaut global (i) de la panne du ventilateur d'extraction ne peut pas être modélisé directement par le biais d'un calendrier de fonctionnement. En effet la façon la plus rapide et simple de réaliser ce défaut aurait été d'imposer au ventilateur de soufflage une période d'arrêt définie par un emploi du temps. Or, EnergyPlus ne permet pas de dissocier les calendriers de fonctionnement des ventilateurs compris dans un même système. Cela aurait donc pour effet de créer une panne des deux ventilateurs de la centrale. Ce défaut doit donc être modélisé par l'intermédiaire *objet* appelé *Fan : ZoneExhaust*. Cet *objet* EnergyPlus est zonal, c'est-à-dire qu'il est associé à une zone thermique spécifique. Le *Fan : ZoneExhaust* consiste en un ventilateur autonome d'extraction pouvant être découplé du système existant de ventilation (*i.e.* possède son propre emploi du temps). Ce ventilateur bien qu'autonome peut être équilibré avec le système existant, ce qui signifie que le débit extrait par le ventilateur zonal est retranché au débit total du ventilateur d'extraction de la centrale. Ainsi en ajoutant un *Fan : ZoneExhaust* par zone thermique et en leur imposant d'extraire le débit d'air dimensionné dans la zone, on annule toute extraction d'air par la CTA. La centrale continue donc à insuffler de l'air traité normalement par les batteries, mais ne possède plus de débit d'extraction, ni de puissance absorbée par son ventilateur. Le résultat est donc identique à ce qui peut être observé lors de l'apparition du défaut, où un air neuf est injecté sans avoir pu être préchauffé par l'air intérieur. L'air intérieur quitte le bâtiment essentiellement par les défauts d'étanchéité et les ouvertures.

#### D.1.1.2 Défaut du ventilateur de soufflage.

Le défaut de la panne du ventilateur de soufflage (ii) comme vu précédemment avec le défaut (i) ne peut pas être simplement modélisé via un emploi du temps. Afin de modéliser ce défaut, le système est arrêté avec un *Availability schedule*. Pour l'extraction de l'air vicié un *objet Fan : ZoneExhaust* est ajouté dans chaque zone thermique comme pour le défaut précédent. Il a pour rôle d'extraire le débit d'air vicié nécessaire. Le débit d'air entrant est assuré avec un *objet ZoneVentilation : DesignFlowRate* par zone thermique. Ce dernier permet l'introduction d'air en modélisant des infiltrations.

#### D.1.1.3 Panne totale des équipements.

La modélisation de la panne simultanée des équipements (iii) est relativement plus simple. Cette panne correspond par exemple au déclenchement de tout le tableau divisionnaire alloué au système. Comme expliqué précédemment les équipements d'un même système sont tous liés entre

eux. EnergyPlus définit un *Availability Manager* qui correspond au calendrier de fonctionnement du système. Cet emploi du temps de fonctionnement est supérieur à tous les calendriers des équipements et donc les outrepassent tous. Ainsi pour effectuer la panne simultanée des équipements il suffit de définir les dates de panne dans l'*Availability Manager*. Ce dernier mettra en pause tout le système durant ces périodes.

#### D.1.1.4 Défaut des ventilateurs.

Le défaut global de la panne simultanée des ventilateurs (*iv*) est également relativement simple à modéliser. Durant cette panne les deux ventilateurs ne recevront plus d'alimentation, et donc plus aucun débit ne circulera dans les gaines. Ainsi les batteries seront à l'arrêt bien que toujours alimentées. Pour modéliser ce défaut l'*Availability Manager* est encore une fois utilisé. En saison estivale, les batteries sont inactives et donc le défaut (*iv*) revient au même que le défaut (*iii*). En revanche en saison de chauffe, les batteries du système sont actives et donc possèdent une consommation de veille. Afin d'obtenir une puissance consommée due à la veille des batteries, un *objet Other Equipment* est créé. Cet *objet* EnergyPlus correspond à un équipement indépendant pouvant absorber et fournir une puissance définie. Cet *Other Equipment* est donc modélisé pour systématiquement consommer au minimum la puissance de veille des batteries durant la saison hivernale et ne rien consommer durant les défauts et l'été. Ainsi un rapide post-traitement des données avec une règle de minimum donnera la consommation souhaitée aux batteries.

#### D.1.1.5 Défaut d'encrassement du filtre.

Le dernier défaut global est celui de l'encrassement du filtre (*v*). Il est réalisé via l'intermédiaire d'un modèle natif de défaut EnergyPlus, mais il est relativement complexe à mettre en œuvre. Le modèle de défaut d'EnergyPlus est un *objet* appelé *Fault Model : Fouling Air Filter*. Il permet d'imposer une augmentation de la quantité de perte de charge présente dans le réseau associé à un ventilateur. Ainsi pour pouvoir fonctionner ce modèle doit être alimenté par deux autres objets importants, un *Curve : Cubic* et un *Pressure Fraction Schedule*. L'objet *Curve : Cubic* correspond à un polynôme d'ordre trois représentant la courbe de fonctionnement du ventilateur subissant les pertes de charge. Ainsi comme illustré sur la Figure D.1 le ventilateur (du moins à débit constant) peut fournir un certain débit pour une augmentation de pression fixée. Le second objet *Pressure Fraction Schedule* est l'emploi du temps de l'évolution des pertes de charge dans le réseau. En appliquant les pertes de charge imposées au réseau par le calendrier, à la courbe du ventilateur, EnergyPlus est en mesure de déterminer la variation de débit induite (en fonction du type de ventilateur).

### D.1.2 Les défauts d'hiver

Les défauts hivernaux qui ont été retenus pour la modélisation seront présentés dans la section suivante. Ces défauts sont, (*i*) la panne de la batterie antigel, (*ii*) la panne de la batterie de soufflage, (*iii*) un défaut de régulation de la batterie antigel, (*iv*) un défaut de régulation de la batterie d'appoint.

#### D.1.2.1 Défaut de la batterie antigel.

Le défaut concernant la panne de la batterie antigel (*i*) a été modélisé par l'intermédiaire de deux *objets*, un *Availability Schedule*, ainsi qu'un *Other Equipment*. La mise en place de l'*Availability Schedule* permet de forcer une mise à l'arrêt de la batterie antigel selon un calendrier. En revanche, la mise en place d'un *Other Equipment* est également nécessaire, car comme

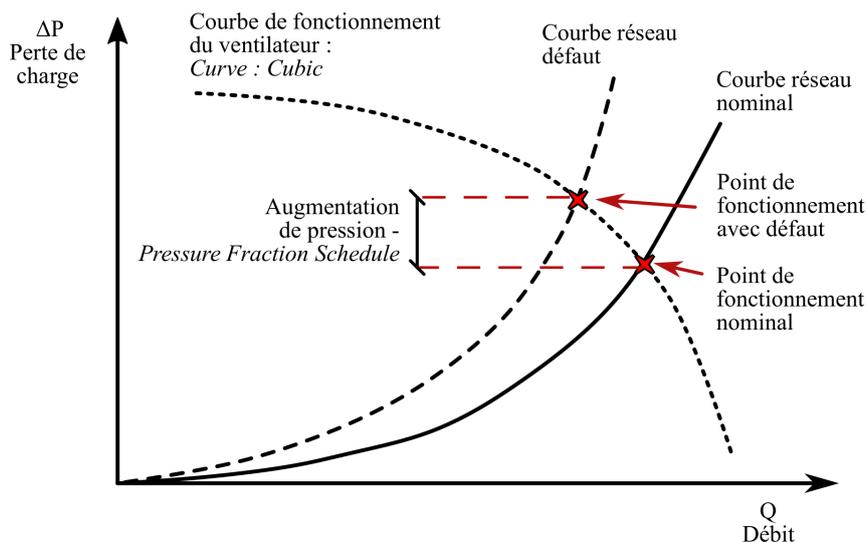


Figure D.1 – Encrassement du filtre, sur la base de la Figure 2.7.

expliqué précédemment l'*Availability Manager* du système est de niveau supérieur. Cela signifie qu'il outrepassé l'emploi du temps de fonctionnement des équipements du système ici de la batterie. Les batteries seront donc considérées comme en panne par exemple lors du défaut simultané des deux ventilateurs (défaut global (iv)). C'est pourquoi un *Objet Other Equipment* est nécessaire afin de déterminer les puissances minimales de consommation de la batterie à l'aide d'un calendrier. Ainsi grâce à un post-traitement rapide les défauts de la batterie et de la panne simultanée des ventilateurs pourront être séparés.

#### D.1.2.2 Défaut de la batterie d'appoint.

Le défaut de la batterie d'appoint (ii) est réalisé selon le même protocole que le défaut hivernal (i). Bien sur les valeurs des *objets Availability Schedule* et *Other Equipment* sont adapté, mais le principe est identique.

#### D.1.2.3 Problème de régulation de la batterie antigel.

Le défaut de régulation de la batterie antigel (iii) correspond au même défaut que celui étudié dans la Chapitre 2 Section 2.5.3.2. Ce défaut correspond à un problème de stabilité du PID induisant une oscillation de la valeur réglée autour du point de consigne. La création de ce défaut est relativement simple, elle consiste à faire varier la valeur de la consigne imposée à la batterie autour de la valeur réelle de la consigne théorique. Ainsi la batterie effectuera des variations de puissance faisant osciller la température en sortie de batterie.

#### D.1.2.4 Problème de régulation de la batterie d'appoint.

Le défaut de régulation de la batterie d'appoint (vi) est du même type que le défaut précédent. Ce défaut est donc modélisé exactement de la même façon que le défaut (iii). La seule différence réside dans la valeur de la consigne théorique autour de laquelle la valeur réglée va osciller.

### D.1.3 Les défauts d'été

Les défauts estivaux concernent uniquement des problèmes de régulation de l'activation du bypass. Les défauts sélectionnés pour la modélisation sont, (i) l'échec de l'activation du bypass et du passage en grande vitesse, (ii) l'enclenchement du bypass sans passage en grande vitesse, (iii) l'échec de l'enclenchement du bypass et le passage en grande vitesse.

#### D.1.3.1 Défaut bypass n°1.

Le défaut (i), correspond à une inactivité totale du système en présence de potentiel de *free cooling*. Sa modélisation est réalisée par l'intermédiaire d'un défaut natif d'EnergyPlus le *Fault Model : Temperature Sensor Offset : Outdoor Air*. Grâce à cet objet il est possible d'imposer selon un emploi du temps une erreur de lecture de la température d'un capteur. Ce défaut correspond à la dérive d'une sonde et il est ici utilisé afin d'ajouter un décalage de lecture de la température extérieure. Ainsi malgré la présence d'une situation favorable au *free cooling*, le système n'effectuera aucun changement de ses conditions de fonctionnement. Cela se traduira donc par la continuité d'un fonctionnement en régime *petite vitesse* des ventilateurs sans bypass de l'échangeur.

#### D.1.3.2 Défaut bypass n°2.

Le défaut (ii) correspond à un problème de régulation où la situation de rafraîchissement est bien détectée. Durant ce défaut le bypass s'active mais la grande vitesse servant à accélérer le phénomène, n'est pas enclenchée. Ce défaut passe par une modification de l'EMS créée pour modéliser le *free cooling*. Lorsque la date prévue pour ce défaut est détectée, un second EMS sera exécuté afin de venir forcer le débit des ventilateurs. Ce code viendra fixer les ventilateurs en petite vitesse.

#### D.1.3.3 Défaut bypass n°3.

Le défaut (iii) est quant à lui le plus complexe à réaliser. Ce défaut représentant par exemple la panne volet du bypass, induit un autre problème de régulation où le potentiel de *free cooling* est détecté car le grand débit est activé, mais l'échangeur n'est pas bypassé. Ce défaut est modélisé par l'intermédiaire d'un modèle de défaut natif EnergyPlus et d'une modification de l'EMS de base. L'objet *Fault Model : Temperature Sensor Offset : Outdoor Air* est encore une fois utilisé pour éviter l'activation du bypass en période de rafraîchissement possible. Le bypass étant désactivé l'EMS principal ne passe pas les ventilateurs en grand débit. C'est pourquoi un autre EMS est ajouté afin de détecter le potentiel de *free cooling*. Si des périodes nécessitant du rafraîchissement durant ce défaut sont détectées, alors les débits sont augmentés.

## D.2 Les résultats

L'analyse des résultats de la modélisation est réalisée en guise de *ground truth*. Ainsi on peut s'assurer que les défauts ont bien été modélisés et que l'outil de FDD détectera bien les bons défauts. Les défauts sont présentés selon leur catégorie : (i) Global, (ii) Hiver ; (iii) Été.

## D.2.1 Les défauts globaux

### D.2.1.1 Défaut ventilateur de soufflage.

Le défaut global étudié ici est la panne du ventilateur de soufflage. Les résultats de la modélisation de ce défaut sont présentés en Figure D.2. La Figure D.2(b) présente l'évolution des températures obtenues avec la simulation. On constate qu'avant l'apparition du défaut les températures évoluent en fonction des échanges dans l'échangeur. Mais à l'apparition du défaut (au 4 décembre), on constate que toutes les températures (excepté la température extérieure) deviennent identiques. Cela s'explique car le système est modélisé dans EnergyPlus comme étant dans le volume chauffé. Ainsi toutes les températures des nœuds du système étant dans les gaines situées dans le volume chauffé, ces dernières se retrouvent à la température intérieure. La Figure D.2(a) présente l'évolution des débits, de la puissance et du rendement durant l'apparition du défaut. On constate en effet que dès l'arrivée de la panne la puissance consommée par le ventilateur de soufflage chute brusquement à zéro, tout comme le débit qu'il met en mouvement. En revanche, la puissance et le débit associés au ventilateur d'extraction continuent à rester constants. L'efficacité de l'échangeur passe également d'une valeur moyenne relativement constante avant l'apparition de la panne, à une valeur nulle dès que les débits sont stoppés. Cet échantillon de simulation permet de valider que les pannes de ventilateur de soufflage sont correctement réalisées. Les résultats de la modélisation correspondent bien aux conséquences attendues d'une vraie panne.

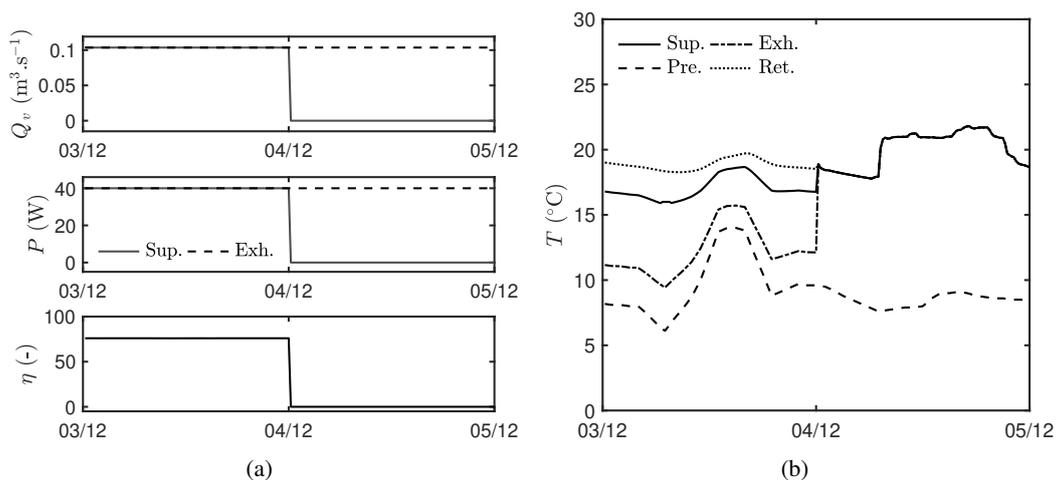


Figure D.2 – Données numériques de la panne du ventilateur de soufflage.

### D.2.1.2 Défaut ventilateur d'extraction.

Le second défaut global concerne la panne du ventilateur d'extraction, il est présenté dans la Figure D.3. Grâce à l'évolution des températures fournie par la Figure D.3(b), il est évident qu'il y a bien deux régimes présents. Avant le défaut on constate bien comme lors du cas précédent, qu'avant la date du défaut, l'évolution des températures est fonction des transferts au sein de l'échangeur. Mais à partir du 09 mars la température de rejet devient égale à la température intérieure (car elle se situe dans le volume chauffé). On constate également que la consigne de soufflage n'est plus assurée durant une certaine période. Cela est dû au fait qu'il n'y a plus de préchauffage dans l'échangeur et que la batterie n'est plus assez puissante pour fournir l'énergie nécessaire pour atteindre la consigne. La Figure D.3(a) présente les débits dans les gaines, les puissances des ventilateurs et l'efficacité de l'échangeur. On constate que la puissance consommée et le débit fourni par le ventilateur d'extraction chutent en même temps à la date du défaut.

L'efficacité est logiquement impactée par cet arrêt du débit.

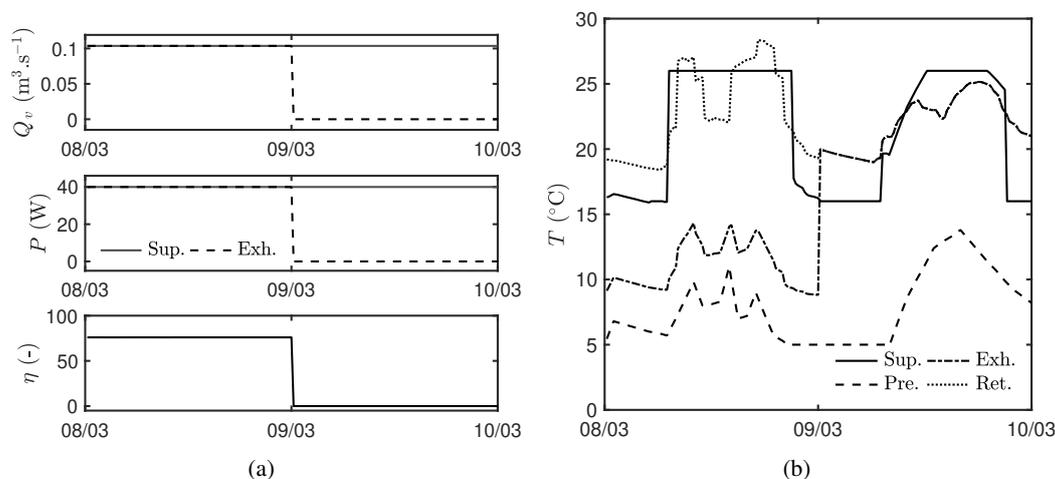


Figure D.3 – Données numériques de la panne du ventilateur d'extraction.

### D.2.1.3 Panne totale des équipements.

La panne totale des équipements est analysée grâce à la Figure D.4. En analysant l'évolution des températures on constate que la température préchauffée  $T_{pre}$  ne descend jamais sous les  $5^{\circ}\text{C}$  avant l'apparition du défaut. On constate également que la température de soufflage suit bien les consignes. À partir de l'apparition du défaut (le 21 février) les températures de soufflage et rejeté deviennent égales à la température intérieure. La température de préchauffage atteint également la température extérieure car la batterie antigel est en panne. La Figure D.4(a) montre l'évolution des débits, ainsi que les puissances des ventilateurs et des batteries à l'apparition du défaut. Il est clair que les débits et les puissances des ventilateurs chutent à zéro lorsque le défaut survient. Les puissances des batteries atteignent également une valeur nulle au 21 février. Il est important de noter qu'avant l'apparition du défaut lorsque les batteries ne fonctionnent pas, elles ont quand même une alimentation de veille. L'échelle des graphiques ne permet pas de rendre compte de ce constat. Ces conditions apparaissent par exemple pour la batterie antigel quelques heures avant la panne.

### D.2.1.4 Défaut des ventilateurs.

La panne simultanée des ventilateurs est présentée dans la Figure D.5. La Figure D.5(a) permet de constater que les débits des deux ventilateurs, ainsi que les puissances qu'ils consomment deviennent nuls dès le 12 janvier. Les puissances des batteries sont réduites à leur puissance de veille (2.5W) après l'arrêt des débits. L'évolution des températures est présentée dans la Figure D.5(b). Une fois encore, la variation de températures semble normale jusqu'à l'arrivée du défaut. Les températures de soufflage et de rejeté se superposent à la température intérieure dès que les ventilateurs tombent en panne.

### D.2.1.5 Défaut d'encrassement du filtre.

Le défaut lié à l'encrassement des filtres est présenté dans la Figure D.6. L'évolution des températures est présentée pour identifier que le défaut apparaît lors d'une période hivernale, mais

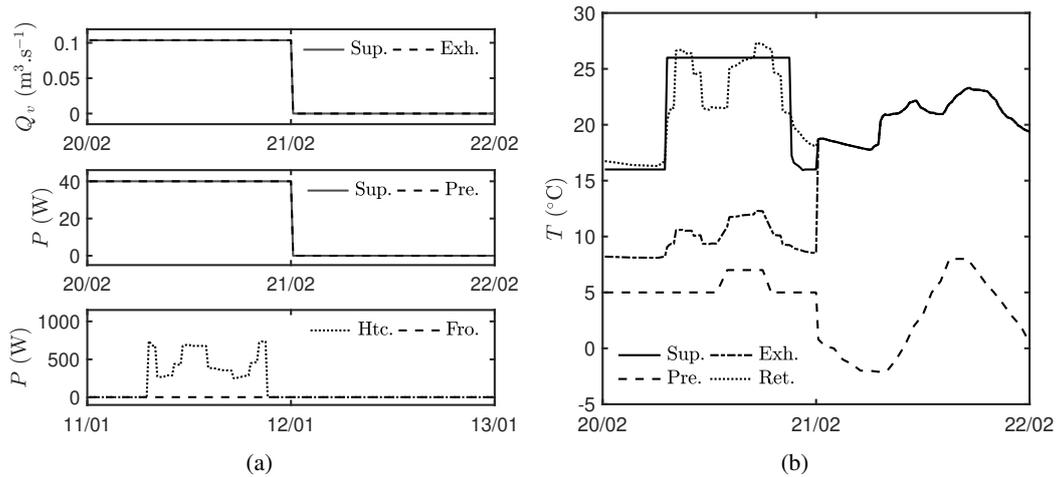


Figure D.4 – Données numériques de la panne totale des équipements.

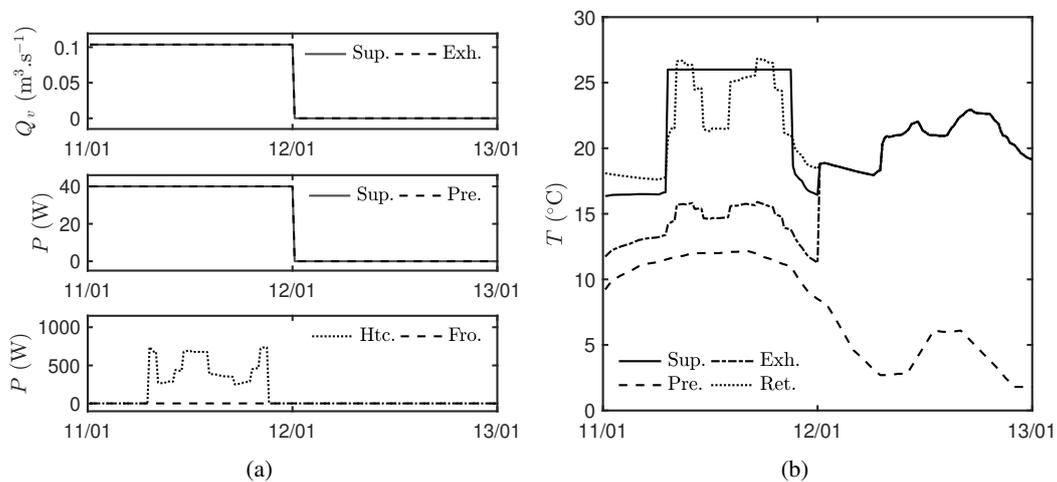


Figure D.5 – Données numériques de la panne des deux ventilateurs.

l'analyse de ces données ne permet pas la mise en évidence du défaut. La Figure D.6(a) qui présente les débits, les puissances de ventilateurs et l'efficacité, permet la détection de l'encrassement. Le débit fourni par les ventilateurs durant la période d'apparition du défaut diminue d'environ deux fois sur l'échantillon présenté. Chacune de ces réductions de débit est à peu près égale à 5% : cela est dû au moteur de calcul qui ne fait pas varier le débit en dessous d'une différence de cette amplitude. En revanche, à chacune des variations de débit la consommation des ventilateurs augmente légèrement en raison de l'augmentation des pertes de charge du réseau.

#### D.2.1.6 Défaut de rupture de courroie.

Le dernier défaut global concerne la rupture de la courroie du ventilateur d'extraction, comme présenté dans la Figure D.7. L'évolution des températures présentée dans la Figure D.7(b) permet de distinguer deux tendances. La première avant l'apparition du défaut, qui traduit une évolution normale des températures et la seconde après l'apparition du défaut. Dans la seconde on constate que la température dans la gaine d'extraction n'est plus modifiée par les transferts au sein de l'échangeur. Elle reste égale à la température intérieure. On constate également que du fait de l'absence d'échange dans l'échangeur, la batterie d'appoint ne parvient pas toujours à maintenir

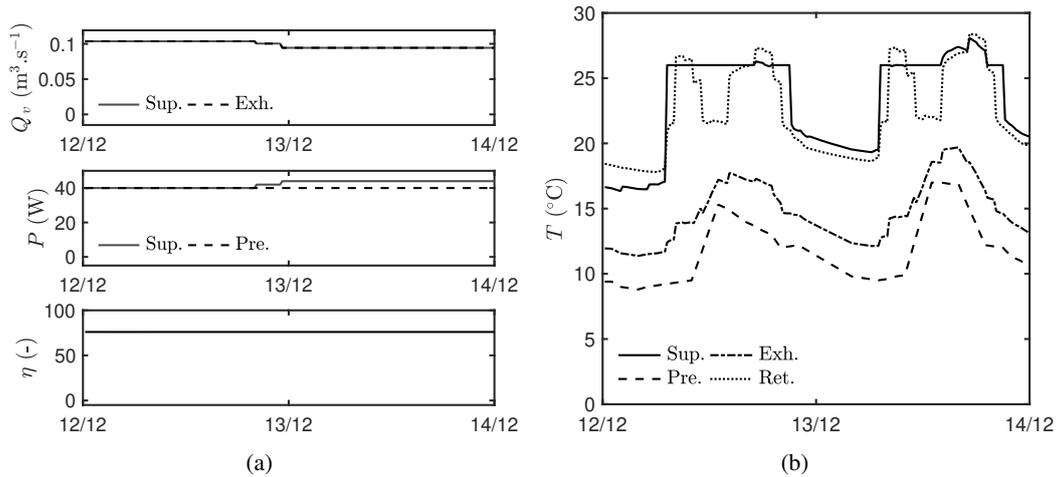


Figure D.6 – Données numériques du défaut d'encrassement.

la température de consigne. La Figure D.7(a) permet également le constat de l'apparition de ce défaut. En effet, dès la date d'apparition du défaut, il est clair que le débit d'extraction est stoppé, alors que le débit de soufflage est maintenu. En revanche, la puissance consommée par le ventilateur d'extraction reste constante. L'efficacité de l'échangeur chute à zéro en même temps que le débit.

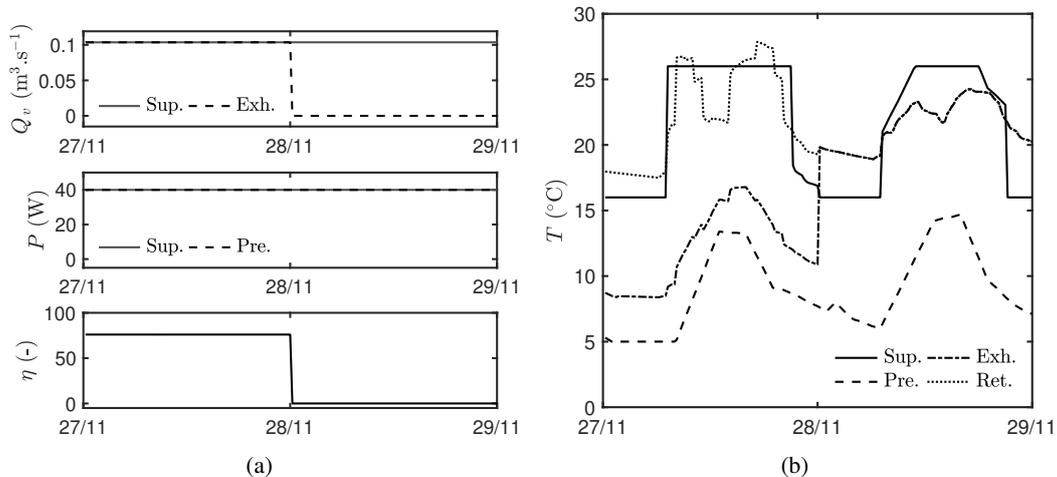


Figure D.7 – Données numériques de la rupture de courroie du ventilateur d'extraction.

## D.2.2 Les défauts d'hiver

### D.2.2.1 Défaut de la batterie antigel.

Le premier défaut d'hiver présenté est le défaut de la panne de la batterie antigel. La Figure D.8(b) présente l'évolution des températures de la vielle du défaut au premier jour en présence du défaut. Avant l'apparition du défaut, la température à la sortie de la batterie de préchauffage ne descend jamais sous les  $5^{\circ}\text{C}$ . Dès le 07 novembre on constate que la température n'est plus préchauffée et atteint même des températures négatives. La Figure D.8(a) permet de constater que les ventilateurs fonctionnent correctement durant toute cette période. Les débits comme les puissances consommées par les ventilateurs sont constants et nominaux. La puissance de la batterie

d'appoint varie sur tout l'échantillon. En revanche, la puissance de la batterie antigel varie avant la date du défaut entre 1000W et 2.5W, mais à partir du 7 novembre elle est maintenue à 0W.

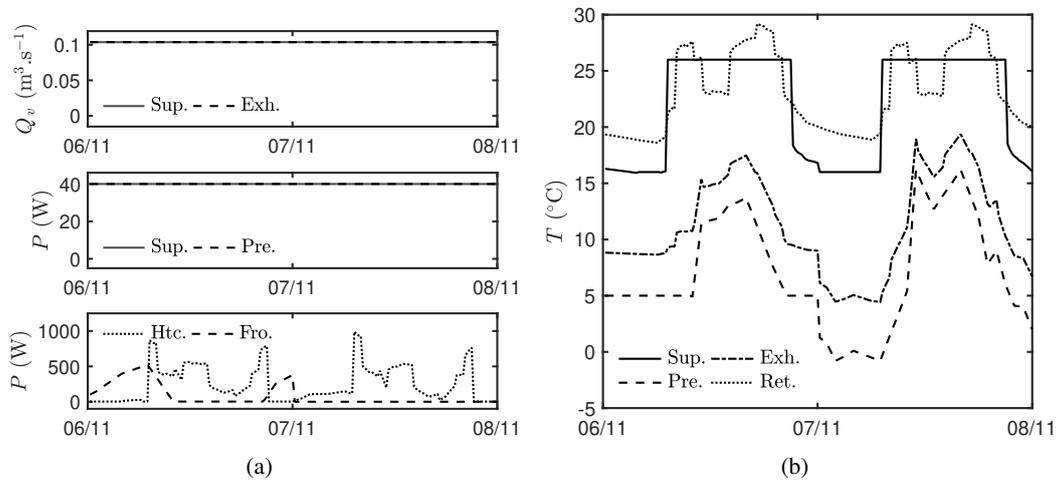


Figure D.8 – Données numériques de la panne de la batterie antigel.

### D.2.2.2 Défaut de la batterie d'appoint.

Le défaut de la panne de la batterie d'appoint est présenté dans la Figure D.9. Grâce à l'évolution des températures on constate que le défaut apparaît le 02 janvier. Avant cette date la température de soufflage est maintenue à la consigne de réduit (16  $^{\circ}\text{C}$ ), c'est donc un jour de week-end. Ensuite, la température de soufflage chute pour atteindre la température de sortie de l'échangeur de chaleur (température entre la température extérieure et intérieure). La Figure D.9(a) présente les débits fournis, les puissances des ventilateurs et des batteries. Les débits fournis durant le test sont maintenus à la valeur nominale. Les puissances consommées par les ventilateurs sont également constantes et nominales. Concernant la puissance de la batterie antigel, elle varie entre 600W et 2.5W durant toute la période présentée. La puissance de la batterie d'appoint est relativement constante la veille de l'apparition du défaut puis chute à 0W et stagne.

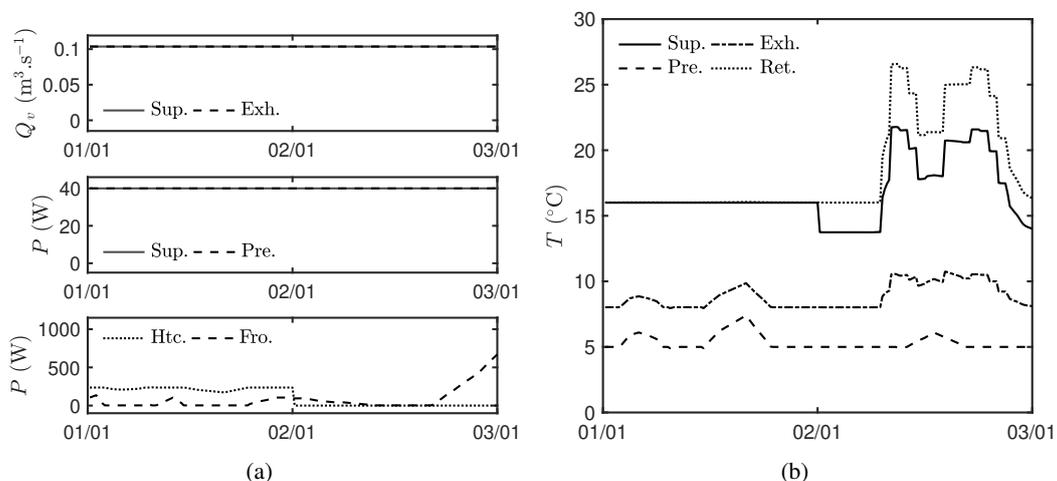


Figure D.9 – Données numériques de la panne de la batterie d'appoint.

### D.2.2.3 Problème de régulation de la batterie antigel.

Le défaut présenté dans la Figure D.10 est le problème de régulation de la batterie antigel. L'évolution des températures permet de voir qu'il y a bien deux états différents. D'abord avant le défaut où l'évolution des températures est nominale. Puis à l'apparition du défaut, on constate que la température de préchauffage oscille, faisant également varier la température rejetée. La température de soufflage oscille également lorsque la consigne est en réduct, car la température en sortie d'échangeur dépasse la consigne à cause de ces variations. La Figure D.10(a) permet de constater que les ventilateurs fonctionnent en régime nominal durant toute cette période. Ils fournissent le débit souhaité et leur puissance est constante. L'analyse des puissances des batteries met en évidence deux régimes comme le montre celle des températures. Avant l'apparition du défaut elles utilisent des puissances de façon normale mais à partir du 02 février cela change. La puissance de la batterie antigel se met à osciller. Cela induit également une oscillation de la batterie d'appoint afin de maintenir la température de soufflage constante à la consigne.

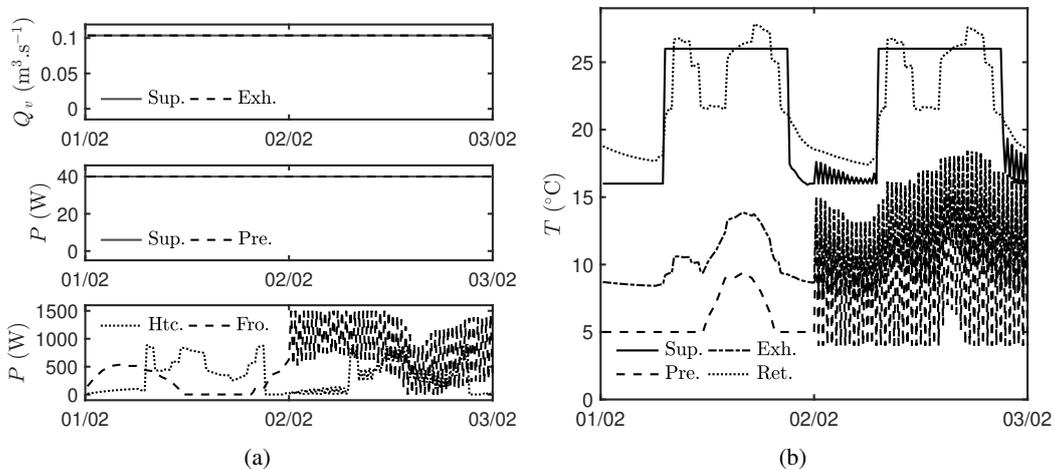


Figure D.10 – Données numériques du défaut de régulation de la batterie antigel.

### D.2.2.4 Problème de régulation de la batterie d'appoint.

Le défaut sur le problème de régulation de la batterie de soufflage est présenté dans la Figure D.11. On constate qu'à partir de la date du défaut la température de soufflage oscille autour de sa valeur habituelle de consigne. Les autres températures évoluent de façon logique durant tout le test. Ces dernières ne sont pas impactées car la batterie d'appoint se trouve en aval de l'échangeur. La Figure D.11(a) présente les débits dans les gaines, les puissances des ventilateurs et des deux batteries. On constate que les ventilateurs fonctionnent de façon nominale. Avant l'apparition du défaut la consommation de la batterie de soufflage varie en fonction des besoins pour assurer la température de consigne. À partir de l'arrivée du défaut sa consommation oscille, traduisant le problème de stabilité du PID. Durant tout ce test la batterie antigel ne consomme que sa puissance de veille (2.5W) car la température extérieure ne descend pas sous les  $5^{\circ}\text{C}$ .

### D.2.2.5 Défaut de la batterie antigel.

Le dernier défaut d'hiver généré est un problème de dérive du capteur servant à l'activation de la batterie antigel. La Figure D.12(b) présente les températures réelles durant le test. On constate que la température à la sortie de la batterie antigel descend sous les  $5^{\circ}\text{C}$ . La température se stabilise

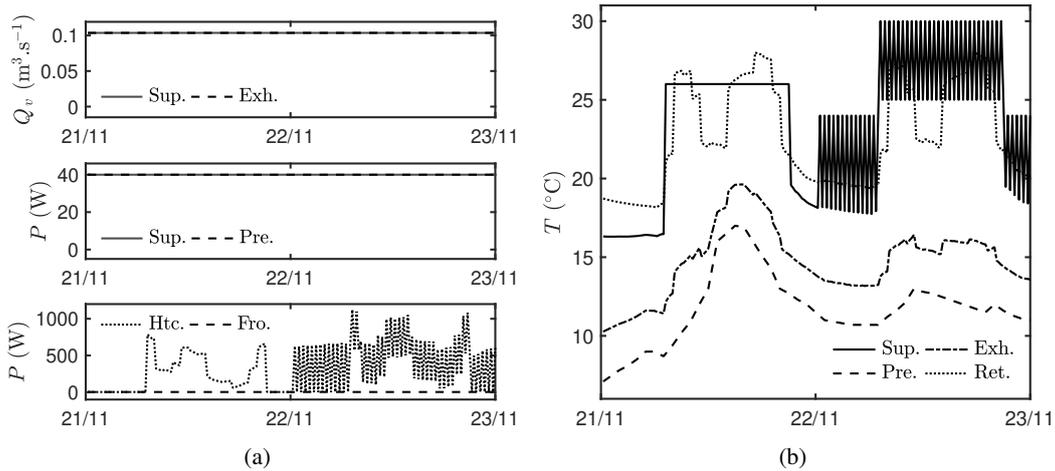


Figure D.11 – Données numériques du défaut de régulation de la batterie d'appoint.

à  $1^{\circ}\text{C}$  durant le deuxième jour du défaut. La Figure D.12(a) permet de constater que la batterie antigel s'active lorsque la température extérieure atteint  $1^{\circ}\text{C}$ . Bien que l'échelle ne permette pas de l'apprécier facilement, il peut être constaté que ce n'est pas une panne. La batterie antigel possède quand même une consommation de veille durant les périodes où elle devrait s'activer (lorsque la température extérieure est inférieure à  $5^{\circ}\text{C}$ ).

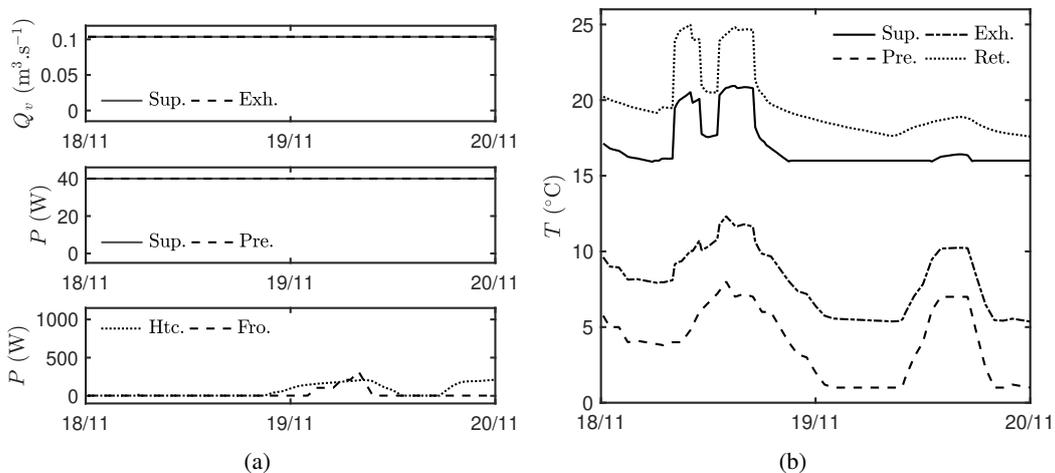


Figure D.12 – Données numériques du défaut de dérive de capteur.

## D.2.3 Les défauts d'été

### D.2.3.1 Défaut bypass n°1.

Le premier défaut d'été est présenté dans la Figure D.13. C'est le cas (i), lorsque le bypass ne s'enclenche pas en période de *free cooling* et que le passage en grande vitesse des ventilateurs n'est pas effectué. La Figure D.13(b) permet grâce aux températures de vérifier les présences potentielles de rafraîchissement. Il y a deux périodes permettant la mise en place de *free cooling* dans cet échantillon : la première avant l'apparition du défaut et la seconde après. La Figure D.13 présente les débits, la puissance des ventilateurs et l'état du bypass. Elle permet la vérification du fonctionnement du système. Avant le défaut, lorsque le potentiel est présent, le bypass est enclen-

ché et le grand débit fourni. À partir du 05 juillet le bypass est maintenu fermé malgré la présence de conditions favorables au rafraîchissement et les débits fournis n'augmentent pas. On constate que le défaut est correctement modélisé.

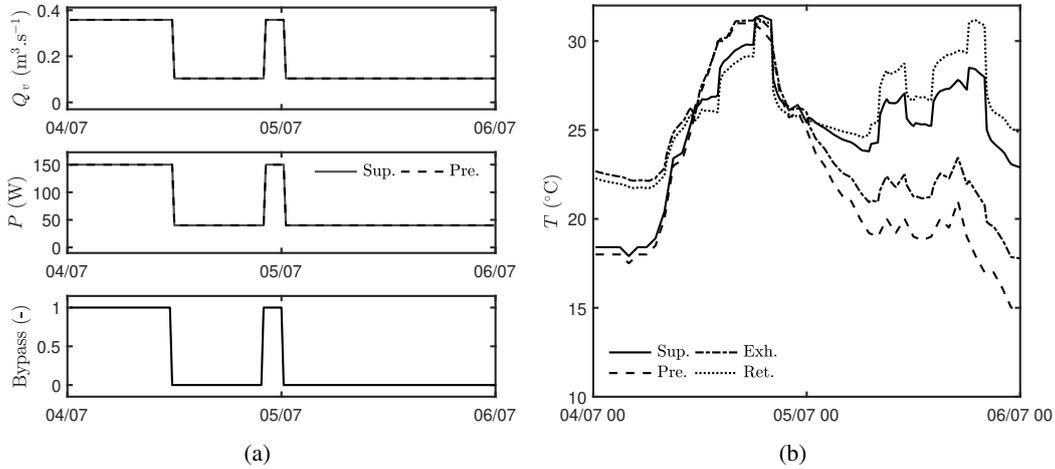


Figure D.13 – Données numériques du défaut régulation du bypass (i).

### D.2.3.2 Défaut bypass n°2.

Le cas où le bypass est actif mais pas les variations débit (ii) est le suivant. La Figure D.14(b) présente l'évolution des températures durant le test et permet d'identifier trois situations favorables au rafraîchissement. La Figure D.14(a) permet de constater qu'au 16 août avant l'apparition du défaut, le système fonctionne de façon optimale. En revanche à partir du 17 août seul le bypass reste actif. Il change bien de position lors des périodes permettant le *free cooling*. En revanche, à partir de cette date les ventilateurs ne fournissent plus le débit approprié.

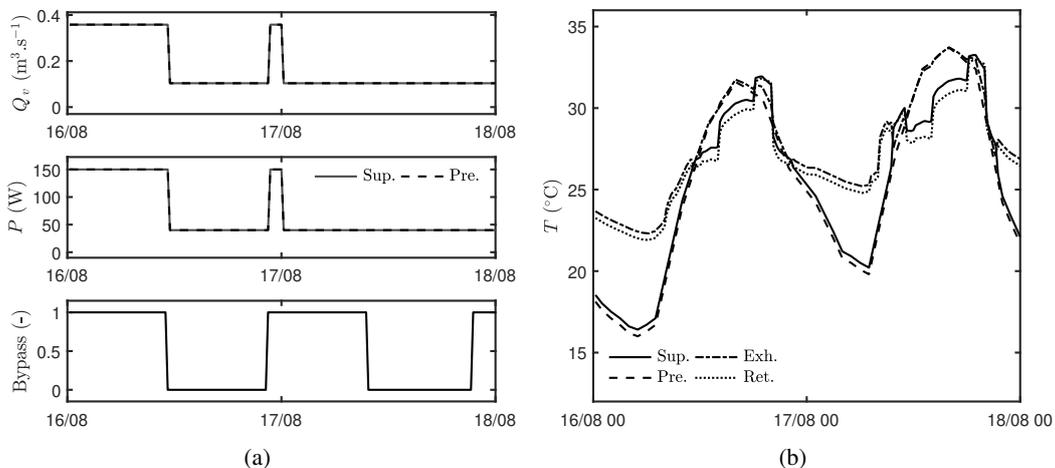


Figure D.14 – Données numériques du défaut régulation du bypass (ii).

### D.2.3.3 Défaut bypass n°3.

Le dernier défaut d'été concerne le cas(iii) où les vitesses des ventilateurs sont bien modifiées en fonction du potentiel mais que le bypass est inactif. La Figure D.15(b) présente les températures et permet d'identifier trois situations permettant le *free cooling* durant l'échantillon. La Figure D.15(a) donne les débits fournis, les puissances des ventilateurs et l'état du bypass. On constate qu'avant l'apparition du défaut le système fonctionne de façon nominale. Après le 07 août, jour de l'apparition du défaut, le bypass reste fermé malgré la présence de situation favorable au rafraîchissement. En revanche, les débits sont bien augmentés lors de ces périodes malgré l'inactivité du bypass.

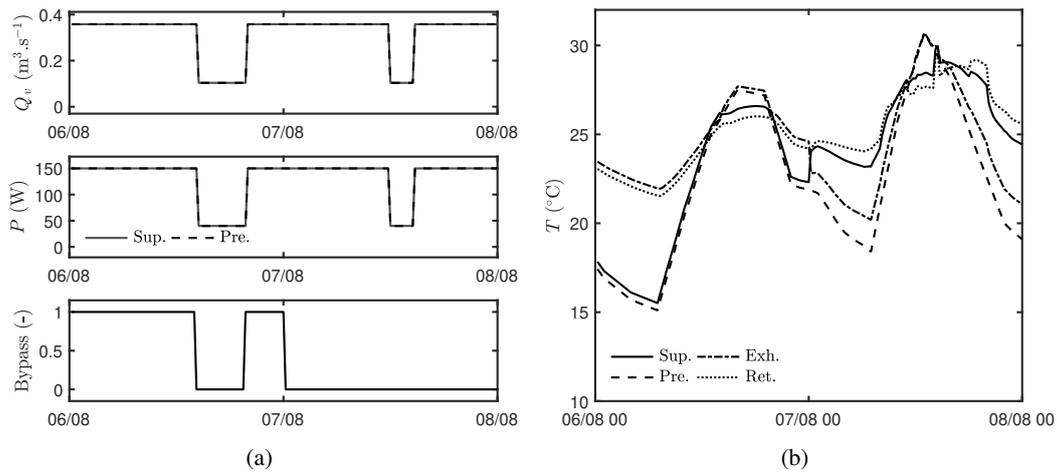


Figure D.15 – Données numériques du défaut régulation du bypass (iii).



# "Méthode pour la détection de défauts des systèmes énergétiques"

"Couplage expertise et méthode de réduction de dimensions"

## Résumé

Le secteur du bâtiment est responsable d'approximativement 41% des consommations en énergie primaire. Les directives internationales cherchant à réduire les consommations énergétiques et émissions de gaz à effet de serre, s'intéressent logiquement à ce secteur. C'est pourquoi ces dernières tendent vers la création et la rénovation de bâtiments et de systèmes toujours plus performants énergétiquement. Parmi les consommations énergétiques du bâtiment, 50% proviennent de l'utilisation des systèmes assurant de bonnes conditions intérieures comme le chauffage, la ventilation et la climatisation (CVC). Néanmoins, l'analyse des données de consommation réelle des bâtiments met en évidence un écart entre les estimations issues des calculs de la phase de conception et les mesures. Ces différences peuvent notamment s'expliquer par le mauvais fonctionnement des systèmes installés. Les dysfonctionnements des systèmes énergétiques induisent des gaspillages de consommation énergétique allant de 25% à 50%, pouvant être réduits considérablement avec un suivi continu. Ces mauvais fonctionnements sont dus à ce que l'on appelle des défauts du système. Ils peuvent prendre des formes différentes comme la dérive de capteur, des pannes ou des problèmes de réglage ou d'entretien. Les méthodes comme le commissionnement des bâtiments et la détection de défauts sont très efficaces pour la réduction des consommations parasites des systèmes. Ainsi elles sont des leviers majeurs pour la réduction des consommations énergétiques dans le secteur du bâtiment. Ces méthodes permettent de déceler l'apparition d'un défaut dans un système et d'en informer les services de maintenance et d'exploitation. L'objectif de ce travail de thèse est le développement d'une méthode de détection de défauts permettant de lever plusieurs des verrous scientifiques et technologiques s'opposant à la diffusion de ce type d'outil. La méthode de détection de défauts développée est hybride, basée sur l'expertise (knowledge-based) et sur les données relevées (data-based). Ce couplage en fait un outil efficace et adaptable, qui permet le suivi et l'estimation de l'état du système en temps réel grâce à un traitement en continu des données par des règles expertes. Les résultats sont alors présentés sous forme de cartes de l'état de fonctionnement du système, obtenues via des méthodes de réduction de dimension. Cet outil est testé sur des systèmes de ventilation dans le cas d'un bâtiment neuf et d'un bâtiment existant. Pour le premier, des données de fonctionnement du système sont générées numériquement afin d'établir les cartes. La détection de défauts est ensuite validée grâce à des données expérimentales de fonctionnement d'un système réel recueillies en environnement semi-contrôlé. Les données expérimentales, correspondant aux fonctionnements du système en condition nominale et défectueux, sont projetées sur les cartes afin de vérifier leur capacité de détection de défauts. Dans le cas de bâtiments existants la méthode est testée sur des données réelles relevées sur plusieurs années. Ces études démontrent l'efficacité de la méthode pour détecter rapidement les défauts du système.

**Mots-clés :** détection de défauts et diagnostic, Systèmes, CVC, réduction de dimensions, savoir expert, comissionnement



The building field accounts for around 41% of the primary energy consumption. As the international directives aim to reduce the energy consumption and greenhouse gas emissions, they count on this sector. So they work toward the creation and refurbishment of buildings and a more energy efficient system. Among the building energy consumption, 50% come from the systems use for indoor comfort as the heating, ventilation, and air conditioning (HVAC). However, the real building consumption data analysis highlights a gap between the expected consumption of the design phase and the measured consumption. These differences can be explained in part by the poor operation of the setup systems. These system failures induce energy waste between 25% and 50% but can be significantly reduced by a good follow-up. These systems' bad operations are called systems faults. These faults can take different forms such as sensors drift, breakdown, setting, or maintenance problems. Building commissioning or fault detection and diagnosis are very effective to reduce the systems' unwanted consumption. Thus they are a major lever to cut down the energy consumption in the building field. These methods allow to detect system faults apparition to alert the maintenance and operation staff. This thesis aims to develop a fault detection and diagnosis method that allow to removing some scientific and technical obstacle whose inhibit the diffusion of these tools. The hybrid fault detection method developed is knowledge and data-based. This coupling form an effective and adaptable tool, that allows the monitoring and the system state estimation in real-time thanks to continuous expert rules treatment. The results are presented under the form of the system operation map obtain thanks to the dimension reduction method. This tool is tested on a ventilation system for a new building and an existing building cases. For the new building case, numerical system operation data are generated for the map construction. Then the fault detection is validated thanks to experimental data from the same system measured in a half-controlled environment. The experimental data represent the nominal and faulty operation of the system. They are projected on the map in order to check their fault detection ability. The existing building case is tested on real measured data of a few years. These studies show the efficiency of the method to quickly detects the system faults.

**Keywords :** Fault detction and diagnosis, systems, HVAC, dimension reduction, knowledge based, commissioning