



HAL
open science

Identification de caractéristiques réduites pour l'évaluation des performances des systèmes solaires combinés

Antoine Leconte

► **To cite this version:**

Antoine Leconte. Identification de caractéristiques réduites pour l'évaluation des performances des systèmes solaires combinés. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENA016 . tel-00661209

HAL Id: tel-00661209

<https://theses.hal.science/tel-00661209>

Submitted on 18 Jan 2012

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie civil et sciences de l'habitat**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Antoine LECONTE

Thèse dirigée par **Gilbert ACHARD**

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

Identification de caractéristiques réduites pour l'évaluation des performances des Systèmes Solaires Combinés

Thèse soutenue publiquement le **14 octobre 2011**,
devant le jury composé de :

M. Christophe MENEZO

Professeur, Président

M. Christian INARD

Professeur, Rapporteur

M. Jean-Jacques ROUX

Professeur, Rapporteur

M. Gilbert ACHARD

Professeur émérite, Directeur de thèse

Mme Céline COULAUD

Ingénieur R&D, Examineur

M. Chris BALES

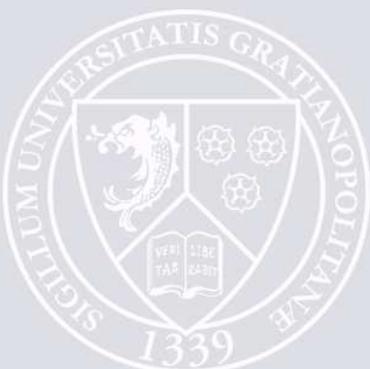
Docteur, Examineur

M. Stéphane GRIEU

Maître de Conférences HDR, Examineur

M. Philippe PAPILLON

Docteur, Examineur



Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus profonds à mon directeur de thèse, Gilbert ACHARD, Professeur émérite au Laboratoire Optimisation et Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE), qui a assuré avec rigueur l'encadrement de ce doctorat. Son expérience, son regard critique et avisé sur les modèles thermiques mis en jeu dans ce projet ont joué un rôle fondamental pour la réalisation de ces travaux. Sans oublier sa grande disponibilité lors de la rédaction de ce mémoire qui m'a permis de conclure ce projet le plus sereinement possible.

Je connaissais par réputation Philippe PAPILLON, docteur au Laboratoire des Systèmes Thermiques (LETh), avant de réaliser cette thèse. Je suis donc très sensible à l'honneur qu'il m'a fait en encadrant mon doctorat et en me témoignant ainsi sa confiance. Je resterai toujours impressionné par sa formidable faculté d'analyse et par sa vision toujours très pertinente à la fois sur ce projet et sur le domaine du solaire thermique en général. Il a ainsi pu orienter judicieusement mes travaux tout au long de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus sincère gratitude.

Mes plus vifs remerciements sont adressés à Jean-Jacques ROUX, professeur à l'INSA Lyon et Christian INARD, professeur à l'Université de la Rochelle, qui ont accepté de dédier une partie de leur temps à l'examen de mon mémoire de thèse.

Je suis également très honoré de pouvoir compter parmi les membres du jury de ma soutenance Céline COULAUD, ingénieur à l'ADEME, Chris BALES, docteur au Solar Energy Research Center en Suède, Stéphane GRIEU, maître de conférence à l'Université de Perpignan Via Domitia et Christophe MENEZO, professeur à l'Université de Savoie, formant ainsi un panel de compétences aussi riches que variées.

Ces travaux n'auraient pu se dérouler sans la participation de l'ADEME et du CEA qui m'ont octroyé une bourse de recherche. Je leur adresse ici mes plus sincères remerciements.

Je suis extrêmement reconnaissant envers Mickaël ALBARIC, du LETh, avec qui j'ai partagé le même bureau pendant quelques années, et Thomas LETZ, d'INES Education. Mon travail a bénéficié de leurs expériences et conseils quant aux performances des SSC et la mise en œuvre expérimentale des tests. Ma reconnaissance est également adressée à Laurence CORNEZ et Sébastien ONIS, du Laboratoire Information, Modèles et Apprentissage (LIMA) du CEA Saclay. Ils ont su à la fois me lancer et me conseiller dans le domaine des réseaux de neurones qui m'était encore inconnu avant cette thèse.

J'adresse un grand merci à Fabien BRUYAT et Franck HALLADJAN, techniciens au LETh, pour leur efficacité, leur réactivité lors de mes manipulations et ce, malgré leurs multiples sollicitations. J'ai également beaucoup apprécié leur passion pour la musique qu'ils affichent chacun à leur manière !

Remerciements

Je tiens par ailleurs à remercier l'ensemble des membres du LOCIE et du LETh, et notamment toutes l'équipe du PUMA3, que je ne peux malheureusement énumérer ici sans ajouter quelques pages supplémentaires à celles déjà très nombreuses de mon mémoire. Leur accueil, leurs conseils et la bonne humeur qu'ils entretiennent ont rendu ces années de thèse à la fois agréables et très enrichissantes, sur le plan scientifique et même bien au-delà.

Je voudrais également exprimer ici toute ma gratitude à Babou, dont je partage l'existence avec bonheur depuis plusieurs années, qui m'a soutenu, réconforté, et surtout aimé durant les hauts et les bas de cette thèse, et plus encore. Pour tout cela et pour ce qu'elle est, je ne la remercierai jamais assez.

Enfin, j'aimerais associer à ce moment particulier mes parents, Réjane et Jean-Louis, mon frère Félix, et aussi tous mes amis. C'est grâce à vous tous que j'en suis ici aujourd'hui. Je me permets donc de vous adresser l'expression de ma plus profonde affection.

SOMMAIRE

RESUME	9
NOMENCLATURE	13
ABBREVIATIONS	21
INTRODUCTION	23
CHAPITRE 1. Etat de l'art sur l'évaluation des performances des Systèmes Solaires Combinés	29
1.1. Les Systèmes Solaires Combinés.....	31
1.1.1. Principes et généralités	31
1.1.1.1. <i>L'enjeu des SSC</i>	31
1.1.1.2. <i>Les principaux composants d'un SSC</i>	32
1.1.1.3. <i>Les principales stratégies de gestion de la chaleur</i>	34
1.1.2. Marchés du solaire thermique et des SSC	38
1.1.2.1. <i>Le marché mondial du solaire thermique</i>	38
1.1.2.2. <i>Le marché européen du solaire thermique</i>	39
1.1.2.3. <i>Le marché français du solaire thermique</i>	40
1.1.2.4. <i>Le marché du SSC, en France et ailleurs</i>	41
1.1.2.5. <i>Les labels et certifications des CESI et des SSC</i>	43
1.1.2.6. <i>Les perspectives pour le marché du solaire thermique</i>	44
1.1.3. Performances des SSC et caractérisation	45
1.1.3.1. <i>Comment évaluer les performances d'un SSC ?</i>	45
1.1.3.2. <i>Le taux d'économie d'énergie</i>	47
1.1.3.3. <i>Caractérisation des performances : la méthode FSC</i>	50
1.2. Les méthodes actuelles d'évaluation des performances des SSC	55
1.2.1. Les deux approches de tests.....	55
1.2.1.1. <i>L'approche composant</i>	56
1.2.1.2. <i>L'approche globale</i>	58
1.2.1.3. <i>Synthèse et sélection de la méthode</i>	59
1.2.2. Description de la méthode SCSPT	60
1.2.2.1. <i>Le banc d'essai semi-virtuel</i>	61
1.2.2.2. <i>L'environnement virtuel de la méthode SCSPT</i>	64
1.2.2.3. <i>La séquence complète</i>	68
1.2.2.4. <i>Validation et résultats de la SCSPT</i>	68
1.3. Conclusion du chapitre.....	74
CHAPITRE 2. Identification d'un modèle global de SSC à partir de données expérimentales	77
2.1. Modélisation de processus.....	80
2.1.1. Les principes généraux de modélisation.....	80
2.1.1.1. <i>Processus et modèle</i>	80
2.1.1.2. <i>Classification générale des modèles</i>	80
2.1.1.3. <i>Choix d'une structure de « modèle-hypothèse »</i>	82
2.1.2. La modélisation non-linéaire dans les domaines du solaire	86
2.1.3. Les réseaux de neurones.....	89
2.1.3.1. <i>Qu'est ce qu'un neurone ?</i>	89
2.1.3.2. <i>Principe et fonctionnement</i>	90
2.1.3.3. <i>Les deux classes de réseaux usuels</i>	92
2.2. Modélisation globale des SSC	94

SOMMAIRE

2.2.1.	Description du modèle proposé	94
2.2.1.1.	Entrées et sorties du modèle global	94
2.2.1.2.	Structure globale retenue	96
2.2.2.	La partie « Boîte Blanche »	97
2.2.2.1.	Méthodologie de validation des modèles	98
2.2.2.2.	Modélisation des capteurs	101
2.2.2.3.	Modélisation des besoins de chauffage (émetteurs et bâtiment)	105
2.2.2.4.	Modélisation du stockage et de l'appoint	115
2.2.2.5.	Bilan sur l'ensemble de la partie « boîte blanche »	123
2.2.3.	La partie « Boîte Noire »	125
2.2.3.1.	Vecteurs de régression des entrées et sorties	125
2.2.3.2.	Application non-linéaire	127
2.3.	Apprentissage du modèle global de SSC	130
2.3.1.	Principe généraux sur l'optimisation paramétrique de modèles	130
2.3.2.	Le processus d'entraînement sélectionné	132
2.3.2.1.	Traitement des données	132
2.3.2.2.	Initialisation des poids synaptiques	133
2.3.2.3.	Algorithme d'entraînement	133
2.3.3.	Le processus de sélection	133
2.3.3.1.	Les structures à tester	134
2.3.3.2.	Le test en Boucle Fermée sur la séquence d'entraînement	134
2.3.3.3.	Les critères de sélection	135
2.3.4.	Le protocole final	136
2.3.4.1.	Test d'un SSC sur le banc d'essai	136
2.3.4.2.	Modélisation et simulations du SSC testé pour la caractérisation de ses performances	137
2.4.	Conclusion du chapitre	138
CHAPITRE 3.	Expérimentation numérique pour la validation de la nouvelle approche	141
3.1.	Le protocole de validation	143
3.1.1.	Les environnements de références	144
3.1.1.1.	Climats	144
3.1.1.2.	Puisages ECS	145
3.1.1.3.	Bâtiments	146
3.1.1.4.	Radiateurs	147
3.1.1.5.	Capteur	148
3.1.1.6.	Bilan	149
3.1.2.	Le processus d'entraînement et de sélection	150
3.1.3.	Les critères de validation	151
3.1.3.1.	Erreur absolue moyenne de l'ensemble des résultats du modèle (MAE)	151
3.1.3.2.	Coefficient de corrélation statistique (R^2)	151
3.1.3.3.	Estimation des courbes caractéristiques	151
3.1.3.4.	Erreur absolue moyenne sur l'estimation des besoins de chauffage par rapport aux besoins de référence (MAE_{ref})	154
3.2.	Modèles détaillés de SSC et exploitations	155
3.2.1.	SSC1	155
3.2.2.	SSC2	160
3.2.3.	SSC3	163
3.3.	Résultats et commentaires	168
3.3.1.	Observations et analyse des séries de procédures	168
3.3.2.	Estimations des performances avec les modèles « Boîte Grises »	175
3.3.2.1.	Remarques générales	175
3.3.2.2.	Analyse du modèle « Boîte Grise » du SSC1	181

3.3.2.3.	<i>Analyse du modèle « Boîte Grise » du SSC2</i>	189
3.3.2.4.	<i>Analyse du modèle « Boîte Grise » du SSC3</i>	195
3.3.3.	Bilan.....	201
3.3.3.1.	<i>Validation de l'approche de modélisation des SSC par « Boîte Grise »</i>	201
3.3.3.2.	<i>Points d'améliorations des modèles « Boîte grise »</i>	201
3.3.3.3.	<i>Etape de traitement des informations nécessaire</i>	203
3.4.	Conclusion du chapitre.....	208
CHAPITRE 4.	Exploitations d'expérimentations réelles pour l'application de la nouvelle approche	211
4.1.	Protocole de test et de caractérisation des SSC	213
4.1.1.	Caractéristiques techniques du banc d'essai semi-virtuel.....	213
4.1.2.	Protocole d'essai et remarques sur les conditions expérimentales.....	216
4.1.3.	Traitement des données.....	222
4.2.	Tests du SSCa	225
4.2.1.	Description du système	225
4.2.1.1.	<i>Conception, fonctionnement du SSCa et remarques sur son installation pour les tests</i>	225
4.2.1.2.	<i>Paramétrage du modèle « Boîte Grise » pour le SSCa</i>	227
4.2.2.	Essais réalisés et données disponibles	229
4.2.2.1.	<i>Essais réalisés selon la méthode « SCSPT classique »</i>	229
4.2.2.2.	<i>Essais réalisés selon la méthode « SCSPT modifiée »</i>	230
4.2.3.	Traitement des données pour l'identification de modèles « Boîte Grise » du SSCa	235
4.2.4.	Résultats et caractérisation	239
4.2.4.1.	<i>Identification à partir de l'Essai1</i>	239
4.2.4.2.	<i>Identification à partir de l'Essai2</i>	246
4.2.4.3.	<i>Comparaison des modèles identifiés à partir de deux essais</i>	251
4.3.	Tests du SSCb	252
4.3.1.	Description du système	252
4.3.1.1.	<i>Conception, fonctionnement du SSCb et remarques sur son installation pour les tests</i>	252
4.3.1.2.	<i>Paramétrage du modèle « Boîte Grise » pour le SSCb</i>	252
4.3.2.	Installation et essais	254
4.3.2.1.	<i>Essais réalisés selon la méthode « SCSPT classique »</i>	254
4.3.2.2.	<i>Essais réalisés selon la méthode « SCSPT modifiée »</i>	256
4.3.3.	Traitement des données pour l'identification de modèles « Boîte Grise » du SSCb	258
4.3.4.	Résultats et caractérisation	261
4.3.4.1.	<i>A partir de l'Essai1 complet</i>	261
4.3.4.2.	<i>A partir de l'Essai1 raccourci</i>	264
4.3.4.3.	<i>A partir des essais complémentaires (Essai2 et Essai3)</i>	269
4.4.	Conclusion du chapitre.....	271
CONCLUSION	275	
BIBLIOGRAPHIE	283	
ANNEXES	297	

ANNEXE A. Modélisation thermique de bâtiment selon la norme ISO13790 : précision sur les équations et paramétrage des bâtiments SFH 298

A.1.	Equations du modèle de bâtiment.....	298
A.1.1.	Présentations des équations et calculs selon la norme ISO13790.....	298
A.2.	Paramètres du modèle pour simulation des bâtiments de la Tâche 32 de l'IEA	300
A.2.1.	Propriétés principales des bâtiments de références	300
A.2.1.1.	<i>Géométrie du bâtiment</i>	<i>300</i>
A.2.1.2.	<i>Structure de l'enveloppe du bâtiment.....</i>	<i>301</i>
A.2.1.3.	<i>Propriétés des surfaces vitrées</i>	<i>301</i>
A.2.1.4.	<i>Ventilation du bâtiment</i>	<i>302</i>
A.2.2.	Paramétrage des bâtiments de référence selon le modèle ISO13790	302
A.2.2.1.	<i>Géométrie et inertie</i>	<i>302</i>
A.2.2.2.	<i>Coefficients de transfert thermique.....</i>	<i>303</i>
A.2.2.3.	<i>Nombre de surfaces pour le calcul de l'ensoleillement</i>	<i>306</i>
A.2.3.	Entrées du modèle ISO13790	307
A.2.3.1.	<i>Les températures extérieures.....</i>	<i>307</i>
A.2.3.2.	<i>Les puissances de chauffage intérieur.....</i>	<i>307</i>
A.2.3.3.	<i>Les apports solaires passifs</i>	<i>307</i>
A.2.4.	Bilan du paramétrage	309

ANNEXE B. Modélisation de la consommation de la chaudière d'appoint selon la Réglementation Thermique 2005 312

B.1.	Formule générale des pertes au point de fonctionnement	312
B.2.	Expression des pertes caractéristiques.....	312
B.2.1.	Pertes à 100% de charge.....	312
B.2.2.	Pertes à charge intermédiaire	313
B.2.3.	Pertes à charge nulle	314
B.3.	Coefficients des valeurs par défaut	315

RESUME

RESUME

Les Systèmes Solaires Combinés (SSC), qui répondent aux besoins d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) et de chauffage d'un bâtiment, peuvent réaliser des économies d'énergie conséquentes. Cependant, leurs performances dépendent énormément de leur conception, de leur installation et surtout de l'environnement énergétique auquel ils sont confrontés (c'est-à-dire les besoins thermiques du bâtiment et les ressources solaire). A ce jour, il est impossible de prédire l'économie d'énergie qu'un SSC permettrait de réaliser. Il n'existe aucun test normatif permettant la caractérisation des performances des SSC, ce qui pénalise le développement de son marché.

La méthode SCSPT (Short Cycle System Performance Test) a pour objectif d'évaluer les performances annuelles des SSC à partir d'un test de 12 jours sur banc d'essai thermique semi-virtuel. Sa particularité est de considérer chaque système comme un unique ensemble ce qui permet, contrairement aux méthodes de type « composant », de prendre en compte les vraies interactions entre les éléments des SSC lors de leur test. Elle montre de très bons résultats mais ceux-ci sont limités à la prédiction des performances du système pour le seul environnement énergétique adopté lors du test.

Ces travaux de recherche proposent une amélioration de la procédure SCSPT en lui ajoutant une étape d'identification d'un modèle générique de SSC à partir de données expérimentales. De cette manière, le modèle identifié pourrait simuler le comportement du SSC testé sur différentes séquences annuelles pour n'importe quel environnement énergétique et ainsi caractériser ses performances (à l'aide de la méthode FSC par exemple).

L'architecture proposée pour ce modèle est du type « Boîte Grise ». Elle mêle une partie « Boîte Blanche » composée d'équations physiques caractéristiques de certains éléments du SSC et une partie « Boîte Noire » constituée principalement d'un réseau de neurones artificiels. Une procédure complète est conçue pour entraîner et sélectionner un modèle correspondant aux SSC à partir des données de leur test sur banc d'essai semi-virtuel.

Cette approche a été validée numériquement grâce à des simulations de trois modèles détaillés de SSC sous TRNSYS. En comparant leurs résultats annuels avec ceux des modèles « Boîtes Grises » entraînés à partir d'une séquence 12 jours, ces derniers sont capables de prédire la consommation en énergie d'appoint de manière très précise pour 27 environnements énergétiques différents.

L'application concrète de cette nouvelle procédure a été réalisée expérimentalement sur deux SSC réels. Elle a confirmé que l'approche était pertinente et cohérente. Elle a également permis d'identifier quelques améliorations pour que la méthode soit totalement opérationnelle.

Ces travaux offrent une base pour avancer dans l'élaboration d'une méthode complète et fiable de caractérisation des SSC qui pourrait conduire à une nouvelle procédure de normalisation et laisserait envisager un étiquetage énergétique.

MOTS CLES

Energie Solaire Thermique, Système Solaire Combiné, Réseau de Neurones, Evaluation des performances, Méthode d'essai, Caractérisation, Standardisation

Solar Combi Systems (SCS) can be very efficient at reducing heat energy bill of a house but their performances depend on the environment they are working in (type of climate and thermal quality of the building). Currently it is impossible to predict how much energy a SCS would save before its installation. There is no standard test to characterize SCS performances and this curbs its market development.

The Short Cycle System Performance Test (SCSPT), that is being developed at the French National Institute of Solar Energy (INES, Chambéry, France), aims to evaluate SCS annual performance from a test on a semi-virtual test bench. Its special feature is to test the whole system as only one part, unlike “component testing” which can’t consider real interaction between combisystems components. The SCSPT method shows good results but performance prediction is limited to only one environment (i.e. one set of system sizing, type of climate and building thermal quality, corresponding with the test).

This work proposes an improvement of the SCSPT procedure by identifying a global SCS model from the test data. In this way, the identified model would be able to simulate the tested SCS behaviour in any environment and thus to characterize its performances.

The proposed model to identify is a “grey box” model, mixing a “white box” model composed of known physical equations and a “black box” model, which is an Artificial Neural Network (ANN). A complete process is developed to train and select a relevant global SCS model from such a test on semi-virtual test bench.

This approach has been validated through numerical simulations of three detailed SCS models. Compared to their annual results, “grey box” SCS models trained from a twelve days sequence are able to predict energy consumption with a good precision for 27 different environments.

Concrete experimentations of this procedure have been applied to two real systems. They have confirmed that the approach is pertinent and revealed some points to improve in order to get it totally operational.

This work offers major basis to get ahead with a complete method to characterize SCS that could lead developing a standardization method from performance evaluation (and eventually complete the European norm EN 15316 for instance) and planning a combisystems performance labelling.

KEYWORDS

Thermal solar energy, Solar Combi system, Neural Network, Performance prediction, Test method, Characterisation, Standardization.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

Variables mathématiques générales

Variable	Désignation	Unité
ε	Erreur de prédiction de la sortie du modèle	
θ	Jeu de paramètre d'un modèle	
φ	Vecteur de régression	
β	Poids synaptiques	
g	Application du modèle du processus	
u	Entrées du processus	

Variables physiques générales

Variable	Désignation	Unité
θ_s	Angle zénithal solaire (angle d'incidence des rayons solaires sur une surface horizontale)	[°]
γ_s	Azimut solaire, par rapport au sud, positif vers l'ouest, négatif vers l'est	[°]
σ	Constante de Stephan-Boltzman	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
ρ_{water}	Masse volumique de l'eau	[kg.m ⁻³]
alb	Albédo	[-]
$c_{p,wat}$	Capacité calorifique de l'eau	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
E_L	Irradiance de grande longueur d'onde ($\lambda > 3\mu m$)	[W.m ⁻²]
G_b	Irradiance solaire directe arrivant sur un plan horizontal	[W.m ⁻²]
G_d	Irradiance solaire diffuse arrivant sur un plan horizontal	[W.m ⁻²]
G_{ref}	Irradiance solaire de référence (1000 W.m ⁻²)	[W.m ⁻²]
T_a	Température de l'air extérieur	[°C]

Critères de modélisation

Variable	Désignation	Unité
$ErrTot$	Erreur totale	
MAE	Erreur absolue moyenne	
R^2	Coefficient de corrélation statistique	
$RMSE$	Erreur type	

Critères de performances des SSC et variables de références

Variable	Désignation	Unité
η_{el}	Rendement de conversion de l'énergie électrique en énergie primaire	[-]
$\eta_{aux,ref}$	Rendement de l'appoint du système de référence	[W]
F_s	Taux de couverture solaire	[-]
$f_{sav,ext}$	Taux d'économie d'énergie étendu	[-]
$f_{sav,therm}$	Taux d'économie d'énergie thermique	[-]
FSC	Fraction solarisable de consommation	[-]
f_{si}	Indicateur de fraction solaire	[-]
$Prod$	Productivité solaire	[-]
$\dot{Q}_{aux,ref}$	Puissance consommée par l'appoint du système de référence	[W]
$\dot{Q}_{loss,ref}$	Pertes du stockage de chaleur du système de référence	[W]
$\dot{Q}_{penalty,dhw}$	Puissance de pénalité liée aux besoins en ECS pour le calcul de l'indicateur de fraction solaire	[W]
$\dot{Q}_{penalty,red}$	Puissance de pénalité réduite pour le calcul de l'indicateur de fraction solaire	[W]
$\dot{Q}_{penalty,ref}$	Puissance de pénalité de référence pour le calcul de l'indicateur de fraction solaire	[W]
$\dot{Q}_{penalty,sh}$	Puissance de pénalité liée aux besoins de chauffage pour le calcul de l'indicateur de fraction solaire	[W]
$Q_{solar,usable}$	Energie solaire récupérable	[Wh]
$V_{store,ref}$	Volume du ballon de stockage du système de référence	[m ³]
\dot{W}_{par}	Puissance électrique consommée par l'appareillage du système	[W]
$\dot{W}_{par,ref}$	Puissance électrique consommée par l'appareillage du système de référence	[W]

Modélisation des capteurs

Variable	Désignation	Unité
θ	Angle d'incidence des rayons solaires sur le capteur	[°]
β	Inclinaison du capteur	[°]

NOMENCLATURE

Variable	Désignation	Unité
$(\tau\alpha)_{en}$	Produit transmittance-absorbance effective du capteur pour un rayonnement solaire direct à incidence normale	[-]
γ	Orientation du capteur, par rapport au sud, positif vers l'ouest, négatif vers l'est	[°]
A_{coll}	Surface de capteur (surface d'entrée si non-précisée)	[m ²]
b_0	Constante pour le calcul du facteur d'angle d'incidence	[-]
c_1	Coefficient de pertes thermiques du capteur à $T_{coll} - T_a = 0$	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
c_2	Coefficient de pertes thermiques du capteur en fonction de la température	[W.m ⁻² .K ⁻²]
c_3	Coefficient de pertes thermiques du capteur en fonction de la vitesse du vent	[W.m ⁻³ .K ⁻¹]
c_4	Coefficient de pertes thermiques du capteur en fonction de la température du ciel	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
c_5	Capacité thermique effective du capteur	[J.m ⁻² .K ⁻¹]
c_6	Rendement optique en fonction du vent	[s.m ⁻¹]
F'	Facteur d'efficacité du capteur	[-]
G_{coll}	Irradiance solaire globale arrivant sur le plan du capteur	[W.m ⁻²]
$G_{coll,b}$	Irradiance solaire directe arrivant sur le plan du capteur	[W.m ⁻²]
$G_{coll,d}$	Irradiance solaire diffuse arrivant sur le plan du capteur	[W.m ⁻²]
K_{θ}	Facteur d'angle d'incidence pour le rayonnement direct	[-]
$K_{\theta d}$	Facteur d'angle d'incidence pour le rayonnement diffus	[-]
\dot{m}_{coll}	Débit du fluide dans le capteur solaire	[kg.s ⁻¹]
$\dot{Q}_{coll,out}$	Puissance fournie par le capteur	[W]
$\dot{Q}_{coll,utile}$	Puissance solaire utile (arrivant en extrémité de la boucle uniquement solaire)	[W]
$\dot{Q}_{sol,net}$	Apports solaires nets sur le plan du capteur	[W.m ⁻²]
T_{coll}	Température moyenne du capteur	[°C]
$T_{coll,in}$	Température du fluide en entrée de capteur	[°C]
$T_{coll,out}$	Température du fluide en sortie de capteur	[°C]
v	Vitesse du vent autour du capteur	[m.s ⁻¹]

Modélisation du bâtiment et des émetteurs de chaleur

Variable	Désignation	Unité
A_f	Surface de plancher conditionné	[m ²]
A_m	Surface représentant la masse thermique totale du bâtiment	[m ²]
A_{sol}	Aire collectrice effective pour le calcul des apports solaires passifs	[m ²]
A_{tot}	Surface totale des parois intérieures	[m ²]
C_{em}	Capacité thermique totale de l'émetteur de chaleur	[J.K ⁻¹]
C_m	Capacité thermique du bâtiment	[J.K ⁻¹]
$H_{tr,em}$	Coefficient de déperdition entre la structure inertielle et l'extérieur du bâtiment	[W.K ⁻¹]
$H_{tr,is}$	Conductance de couplage entre le nœud central et l'air intérieur du bâtiment	[W.K ⁻¹]
$H_{tr,ms}$	Coefficient d'échange entre la structure et l'ambiance intérieure du bâtiment	[W.K ⁻¹]
$H_{tr,op}$	Coefficient de déperdition entre l'extérieur et l'ambiance intérieure du bâtiment	[W.K ⁻¹]
$H_{tr,w}$	Coefficient de déperdition thermique des parois sans inerties du bâtiment	[W.K ⁻¹]
H_{ve}	Coefficient de déperdition thermique du bâtiment due à la ventilation	[W.K ⁻¹]
K	Constante caractéristique du fonctionnement du radiateur	[W.K ⁻ⁿ]
\dot{m}_{em}	Débit du fluide dans l'émetteur de chaleur	[kg.s ⁻¹]
n	Exposant caractéristique du fonctionnement du radiateur	[-]
$\dot{Q}_{b,int}$	Apports de chaleur interne au bâtiment	[W]
$\dot{Q}_{b,sol}$	Apports solaires passifs au bâtiment	[W]
\dot{Q}_{em}	Puissance délivrée à l'émetteur de chaleur	[W]
$\dot{Q}_{loss,GLO}$	Flux radiatif GLO vers la voûte céleste	[W]
\dot{Q}_{sh}	Puissance délivrée à l'air intérieur pour les besoins de chauffage	[W]
$\dot{Q}_{sh,d}$	Puissance de dimensionnement de l'émetteur de chaleur	[W]
$T_{a,d}$	Température extérieure de base, utilisée pour le dimensionnement du circuit de chauffage	[°C]

NOMENCLATURE

Variable	Désignation	Unité
T_{em}	Température moyenne de l'émetteur de chaleur	[°C]
$T_{em,in}$	Température du fluide en entrée de l'émetteur de chaleur	[°C]
$T_{em,in,d}$	Température d'entrée du radiateur, utilisée pour le dimensionnement du circuit de chauffage	[°C]
$T_{em,out}$	Température du fluide en sortie de l'émetteur de chaleur	[°C]
$T_{em,out,d}$	Température de sortie du radiateur, utilisée pour le dimensionnement du circuit de chauffage	[°C]
T_m	Température représentative de la masse thermique du bâtiment	[°C]
T_{room}	Température de l'air intérieur, dans le bâtiment	[°C]
T_s	Température du nœud central du modèle de bâtiment (représentative de la température de l'air et de la température radiante moyenne)	[°C]
T_{sup}	Température de l'air neuf entrant	[°C]
$(UA)_{building}$	Coefficient de pertes du bâtiment	[W.K ⁻¹]
$(UA)_{em}$	Conductance du radiateur	[W.K ⁻¹]
x_{at}	Ratio entre la surface des parois internes et la surface de plancher	[-]

Modélisation du ballon de stockage, de la chaudière d'appoint, des besoins en ECS et des différents circuits

Variable	Désignation	Unité
$\lambda_{insulation}$	Conductivité thermique de l'isolant	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{pipe}	Conductivité thermique du tube	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
α_{inside}	Coefficient de transfert de chaleur superficiel à l'intérieur du tube	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
$\alpha_{outside}$	Coefficient de transfert de chaleur superficiel à l'extérieur du tube	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
C_{store}	Capacité thermique du ballon de stockage	[J.K ⁻¹]
d_{inside}	Diamètre interne du tube	[m]
$d_{insulation}$	Diamètre externe du tube avec l'isolant	[m]
$d_{outside}$	Diamètre externe du tube sans l'isolant	[m]

Variable	Désignation	Unité
l_{pipe}	Longueur du tube	[m]
\dot{m}_{aux}	Débit du fluide dans le système d'appoint	[kg.s ⁻¹]
\dot{m}_{DHW}	Débit de puisage de l'Eau Chaude Sanitaire	[kg.s ⁻¹]
\dot{Q}_{aux}	Puissance consommée par le système d'appoint	[W]
$\dot{Q}_{aux,out}$	Puissance fournie par le système d'appoint	[W]
\dot{Q}_{dhw}	Puissance délivrée pour les besoins en Eau Chaude Sanitaire	[W]
<i>Regul</i>	Type de régulation du chauffage (pour le modèle de générateur à combustion)	[-]
R_{pipe}	Resistance thermique du tube, basée sur sa surface interne	[K.m ² .W ⁻¹]
$T_{amb,store}$	Température d'ambiance du ballon de stockage	[°C]
$T_{aux,cold}$	Température moyenne du circuit appoint, coté « froid »	[°C]
$T_{aux,hot}$	Température moyenne du circuit appoint, coté « chaud »	[°C]
$T_{aux,in}$	Température du fluide en entrée du système d'appoint	[°C]
$T_{aux,out}$	Température du fluide en sortie du système d'appoint	[°C]
T_{DHW}	Température de l'Eau Chaude Sanitaire	[°C]
$T_{set,dhw}$	Température de consigne de l'ECS	[°C]
T_{store}	Température moyenne du ballon de stockage	[°C]
T_{tap}	Température de l'eau froide en entrée du réseau sanitaire	[°C]
<i>Type</i>	Type de chaudière (pour le modèle de générateur à combustion)	[-]
$(UA)_{aux,loop,cold}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit appoint, coté « froid »	[W.K ⁻¹]
$(UA)_{aux,loop,hot}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit appoint, coté « chaud »	[W.K ⁻¹]
$(UA)_{coll,loop,cold}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit capteur, coté « froid »	[W.K ⁻¹]
$(UA)_{coll,loop,hot}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit capteur, coté « chaud »	[W.K ⁻¹]
$(UA)_{dhw,loop,cold}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit ECS, coté « froid »	[W.K ⁻¹]

NOMENCLATURE

Variable	Désignation	Unité
$(UA)_{dhw,loop,hot}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit ECS, coté « chaud »	$[W.K^{-1}]$
$(UA)_{em,loop,cold}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit émetteur, coté « froid »	$[W.K^{-1}]$
$(UA)_{em,loop,hot}$	Coefficient de pertes des tuyaux du circuit émetteur, coté « chaud »	$[W.K^{-1}]$
$(UA)_{pipe}$	Coefficient de pertes d'un tube	$[W.K^{-1}]$
$(UA)_{store}$	Coefficient de pertes du ballon de stockage	$[W.K^{-1}]$
$(UA)_{store,ref}$	Coefficient de pertes du stockage du système de référence	$[W.K^{-1}]$
<i>Ventil</i>	Présence ou non de dispositif de circulation d'air ou de produit de combustion dans le circuit de combustion (pour le modèle de générateur à combustion)	
V_{store}	Volume du ballon de stockage du système testé	$[m^3]$

ABBREVIATIONS

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
BBC	Bâtiment Basse Consommation
CCT	Concise Cycle Test
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives
CEN	Comité Européen de Normalisation
CESI	Chauffe Eau Solaire Individuel
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CTSS	Component Test System Simulation
DHW	Domestic Hot Water (traduction anglaise de « ECS »)
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EN	Norme européenne
ENV	Prénorme européen
ESTIF	European Solar Thermal Industry Federation
ESTTP	European Solar Thermal Technology Platform
EUREC	European Renewable Energy Agency Centres
IEA	International Energy Agency
INES	Institut National de l'Energie Solaire
ISO	Norme internationale
NF	Norme française
PSD	Plancher Solaire Direct
SCSPT	Short Cycle System Performance Test
SFH	Single Family House
SHC	Solar Heating and Cooling
SSC	Système Solaire Combiné
TRNSYS	Transient System Simulation

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La société occidentale s'est développée de manière très importante depuis l'ère industrielle en profitant, à l'époque, de l'abondance d'énergie fossile bon marché. Grosse consommatrice de pétrole, elle en est même devenue fortement dépendante : aujourd'hui, la part du pétrole dans la consommation énergétique primaire mondiale est de 33%. Toutes les énergies fossiles réunies représentent 81% de cette consommation selon l'Agence Internationale de l'Energie¹.

Depuis, l'équilibre offre/demande qui maintenait le pétrole à un prix très bas, se trouve fortement perturbé par une croissance toujours de plus en plus importante des pays émergents et par la fin prévisible des réserves (l'ASPO² a revu ses prévisions à la baisse, ramenant entre 2008 et 2010 la date du « peak oil »). Ce déséquilibre amorce actuellement une crise économique durable qui marque sûrement la fin de l'ère du pétrole.

De plus, l'utilisation massive de combustibles fossiles cause de graves dommages à notre environnement et provoque des changements climatiques de grande envergure. Elle a introduit un excès de CO₂ qui n'a pas encore trouvé sa place dans le cycle de la matière organique et a contribué à l'augmentation de l'effet de serre. A cause de cela, l'état actuel de la planète devient de plus en plus préoccupant.

Le contexte actuel nous pousse donc à réfléchir sur nos consommations énergétiques. Le développement de nouveaux comportements et d'énergies de substitution est indispensable. Par conséquent, il convient de limiter et rendre plus efficace l'usage de l'énergie, et de se tourner vers des sources d'énergies renouvelables. Ces énergies sont inépuisables et limitent fortement la pollution en diminuant les émissions de CO₂. Ainsi le Conseil et le Parlement européen ont-ils approuvé en 2008 le paquet « énergie-climat » (appelé aussi plan « 20-20-20 ») qui vise la réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre en augmentant de 20% l'efficacité énergétique de l'Union Européenne et en portant à 20% la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen d'ici 2020.

Pour diversifier le bouquet énergétique, plusieurs types de ressources naturelles sont à notre disposition : la géothermie, le vent, la biomasse, l'eau et le soleil. L'énergie solaire, qui est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, est aussi une source inépuisable d'approvisionnement immédiat en énergie. Grâce à divers procédés, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en biomasse (photosynthèse), en électricité (conversion photovoltaïque) ou en chaleur (conversion thermique). Le solaire thermique peut être décliné de plusieurs façons et notamment en Systèmes Solaires Combinés.

Ces systèmes transforment l'énergie solaire en chaleur qui, couplée rationnellement à une énergie d'appoint, permet de répondre aux besoins d'eau chaude sanitaire et de chauffage de l'habitat. Le secteur du bâtiment étant un des plus énergivores (il représente par exemple 43% de la consommation d'énergie finale française et 25% des émissions nationales de CO₂ selon l'ADEME³), une introduction massive de SSC dans le parc résidentiel et tertiaire réduirait de manière très significative la part

¹ <http://www.iea.org/statist/index.htm> (accès le 11 juillet 2011)

² Association pour l'étude du pic pétrolier et gazier. <http://www.peakoil.net/> (accès le 11 juillet 2011)

³ <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12846> (accès le 11 juillet 2011)

d'énergie fossile dans la consommation énergétique globale et ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

Même s'il a connu une chute ces deux dernières années due à la crise financière, le secteur du solaire thermique en Europe est dynamique, avec un marché qui a quasiment triplé depuis 2000. En France, le taux de croissance annuel pour ce marché est en moyenne de 40% sur cette même période. Pourtant, le marché des SSC en particulier ne connaît pas un engouement de cette ampleur (par exemple, l'installation de SSC a diminué de quasiment 50% entre 2006 et 2010 pour finalement ne représenter qu'à peine 15% de la surface de capteur thermique installée en France). On constate qu'il est indispensable d'améliorer d'une part la qualité des installations et d'autre part la prise en compte réglementaire de ces solutions, en parallèle avec une meilleure information des consommateurs qui aujourd'hui fait malheureusement défaut.

S'il existe des méthodologies de caractérisation des performances pour les chauffe-eau solaires individuels (CESI), il en est tout autrement pour les SSC, alors que les investissements sont plus élevés de même que les enjeux énergétiques. En effet, la grande variété de ce genre de système, conjuguée à la sensibilité de leurs performances vis-à-vis non-seulement de leur conception et de leur installation mais également de la ressource solaire et des besoins énergétiques qu'ils doivent compenser, rend leur caractérisation très difficile.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans une démarche d'étude amont, nécessaire afin d'élaborer une méthodologie de caractérisation de SSC fiable, complète, reproductible, et de trouver le meilleur compromis possible entre coûts des essais et richesse de l'information obtenue.

Dans un premier temps, un état de l'art des SSC est réalisé. Il permet de décrire leur fonctionnement en général et de souligner la grande variété de typologie de ces systèmes, ainsi que les verrous limitant le développement de leur marché. Les différentes méthodes existantes de test de performances des SSC en laboratoire, actuellement en cours de développement, sont étudiées. Il ressort de cette étude que la méthode SCSPT semble pertinente. Elle teste de manière fiable les SSC à l'aide d'une séquence de 12 jours caractéristiques mais présente le désavantage de n'estimer les performances des systèmes testés que pour un environnement énergétique donné (climat et bâtiment).

Une nouvelle approche est ensuite proposée. Par comparaison avec les résultats actuellement obtenus par la méthode SCSPT, elle permettrait de recueillir beaucoup plus d'information sur les SSC testés, à partir du même genre d'essai. Cette extension de la méthode est basée sur l'identification d'un modèle évolué du système testé, qui autoriserait l'évaluation de ses performances pour n'importe quel environnement énergétique, par le biais de simulations annuelles. La caractérisation des performances des SSC, à l'aide de simples courbes, serait donc possible en utilisant les données de simulations avec la méthode FSC.

Pour cela, on va étudier les méthodes générales de modélisation de processus. A partir de cette étude, une architecture de modèle générique de SSC est proposée.

INTRODUCTION

Elle est de type « Boîte Grise », mêlant équations caractéristiques normatives de certains éléments du système (partie « Boîte Blanche ») et réseaux de neurones artificiels (partie « Boîte Noire »). Ces derniers apprennent le comportement propre à chaque SSC, à partir des données issues du test SCSPT sur banc d'essai thermique semi-virtuel. Une procédure complète d'entraînement et de sélection d'un modèle neuronal correspondant au système testé, est définie comme extension du protocole de la méthode SCSPT.

Une expérimentation numérique de cette nouvelle méthodologie à l'aide de 3 modèles détaillés de SSC sous TRNSYS permet d'évaluer la pertinence de cette approche.

Finalement, la méthodologie proposée est appliquée à des SSC réels pour pouvoir juger de sa mise en œuvre expérimentale. Les résultats sont encourageants et nous permettent de souligner les points forts et les points faibles des modèles « Boîte Grise », de leur entraînement et de leur sélection.

CHAPITRE 1. Etat de l'art sur l'évaluation des performances des Systèmes Solaires Combinés

Résumé du chapitre

L'objectif des Systèmes Solaires Combinés (SSC) est de répondre aux besoins en ECS et en chauffage d'une habitation en utilisant le moins possible d'énergie d'appoint, par une valorisation performante de l'énergie solaire. Pour atteindre cet objectif, la conception des SSC repose sur l'assemblage hydraulique de nombreux composants (stockage, vanne, circulateurs, ...) asservis pour certains d'entre eux à un contrôle-commande. Une grande variété de solutions technologiques plus ou moins performantes et/ou adaptées à certaines situations est aujourd'hui disponible sur le marché.

Dans un contexte de progression globale du marché du solaire thermique notamment en Europe, le marché des SSC peine à se développer comparé à celui des CESI par exemple, bien que ces systèmes soient prometteurs et comptent parmi les clefs pour relever les enjeux énergétiques de demain. Le manque de connaissance de ces systèmes complexes, en balance avec leur coût d'installation, empêche un développement serein de cette technologie. Il manque véritablement une caractérisation fiable des SSC pour donner les moyens aux potentiels utilisateurs de choisir de manière éclairée un système parmi l'offre diverse et variée, et ainsi permettre à ce marché de se développer convenablement et favorablement.

Or il est difficile de mesurer et caractériser les performances d'un SSC. Le taux d'économie d'énergie, critère de performance le plus pertinent, est très dépendant de l'ensoleillement, des besoins de chauffage et d'ECS. Pourtant, il est possible de caractériser ce critère quelles que soient les conditions énergétiques, à l'aide d'une simple courbe construite grâce à la méthode FSC. Cependant, il n'y a aujourd'hui aucun moyen de construire les courbes caractéristiques à partir d'un test court sur le système.

Des méthodes expérimentales existent et sont en cours de développement. Suivant la philosophie adoptée, ces méthodes permettent d'obtenir :

- Soit des évaluations pour n'importe quelle condition mais en supposant un fonctionnement idéal et tronqué du système;
- Soit une évaluation fiable et complète des performances des systèmes mais uniquement pour une condition donnée.

La méthode SCSPT, utilisant cette dernière approche, a déjà montré de très bons résultats. Son protocole est décrit dans cette partie. C'est la méthode retenue comme point de départ de cette thèse. Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire proposent une extension de la méthode SCSPT pour pouvoir extrapoler les résultats d'un test à d'autres environnements énergétiques, via l'identification de modèles globaux évolués.

1.1. Les Systèmes Solaires Combinés

1.1.1. Principes et généralités

1.1.1.1. L'enjeu des SSC

Les Systèmes Solaires Combinés sont des systèmes solaires thermiques actifs qui utilisent l'énergie du soleil, via un capteur solaire, pour couvrir une partie des besoins en Eau Chaude Sanitaire (ECS) et en chauffage d'un bâtiment. En théorie, l'énergie reçue annuellement sur une faible surface peut être bien supérieure aux besoins thermiques d'une habitation standard. En considérant une irradiation solaire de 1000 kWh/m²/an⁴, une surface de 25m² bien orientée reçoit autant d'énergie que les besoins en chaleur d'une famille de 4 personnes dans une maison moyennement isolée à Stockholm⁵. Dans les mêmes conditions d'irradiation, les besoins d'une maison labélisée Bâtiment Basse Consommation (BBC) en France⁶ correspondent à une surface inférieure à 10m². Cependant, le dilemme de ce genre d'installation est que l'évolution des besoins n'est pas en adéquation avec la ressource solaire disponible, comme le montre la Figure 1-1.

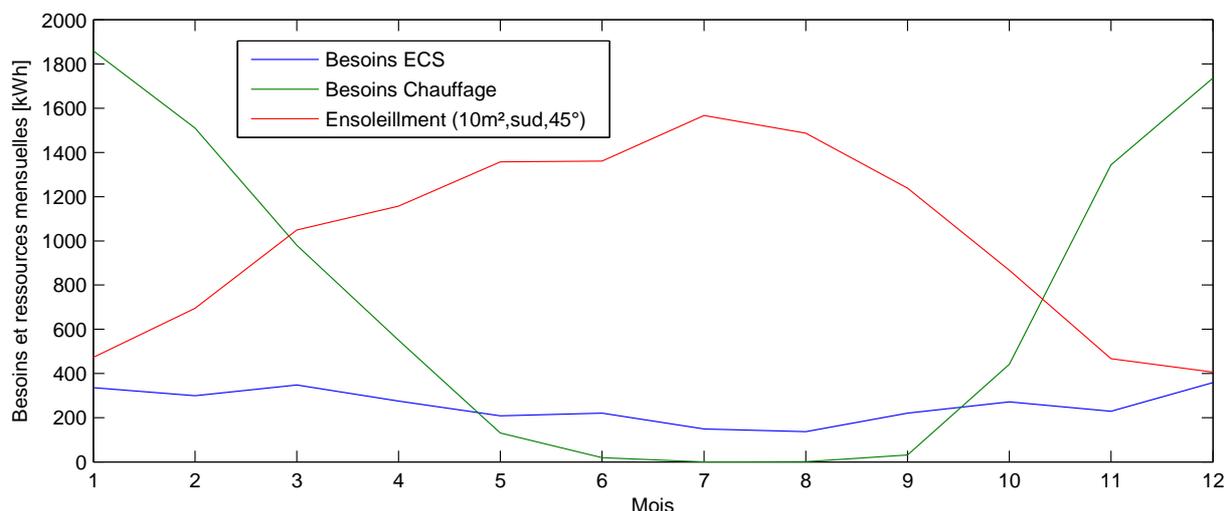


Figure 1-1 Evolution de l'énergie solaire disponible en comparaison avec l'évolution des besoins en chauffage et en ECS

Pendant la période estivale, la quantité d'énergie solaire est nettement supérieure aux besoins alors qu'en hiver, il n'y a pas assez de soleil pour couvrir les besoins de chauffage. Il y a besoin dans ce cas d'au moins une source d'énergie d'appoint. Même à l'échelle d'une journée, le déphasage entre la ressource solaire et les besoins thermiques rend l'utilisation d'un stockage de chaleur nécessaire. Par conséquent, la complexité du chauffage solaire ne se résume pas seulement à un dimensionnement de la surface des capteurs. C'est un ensemble captage/stockage/appoint qu'il faut déterminer pour pouvoir adapter son fonctionnement aux fluctuations de la météorologie et valoriser au mieux l'énergie solaire.

⁴ Valeur basse européenne, d'après la carte éditée par Tecsol (<http://www.tecsol.fr/>).

⁵ En prenant les valeurs maximales obtenues issues des simulations de [Heimrath, 2007].

⁶ Besoins inférieurs à 50 kWh/m²/an, qui sera l'exigence réglementaire à partir de 2012 selon le Grenelle de l'environnement [Grenelle, 2009].

Ainsi la représentation globale d'un SSC peut-elle se faire de la manière suivante :

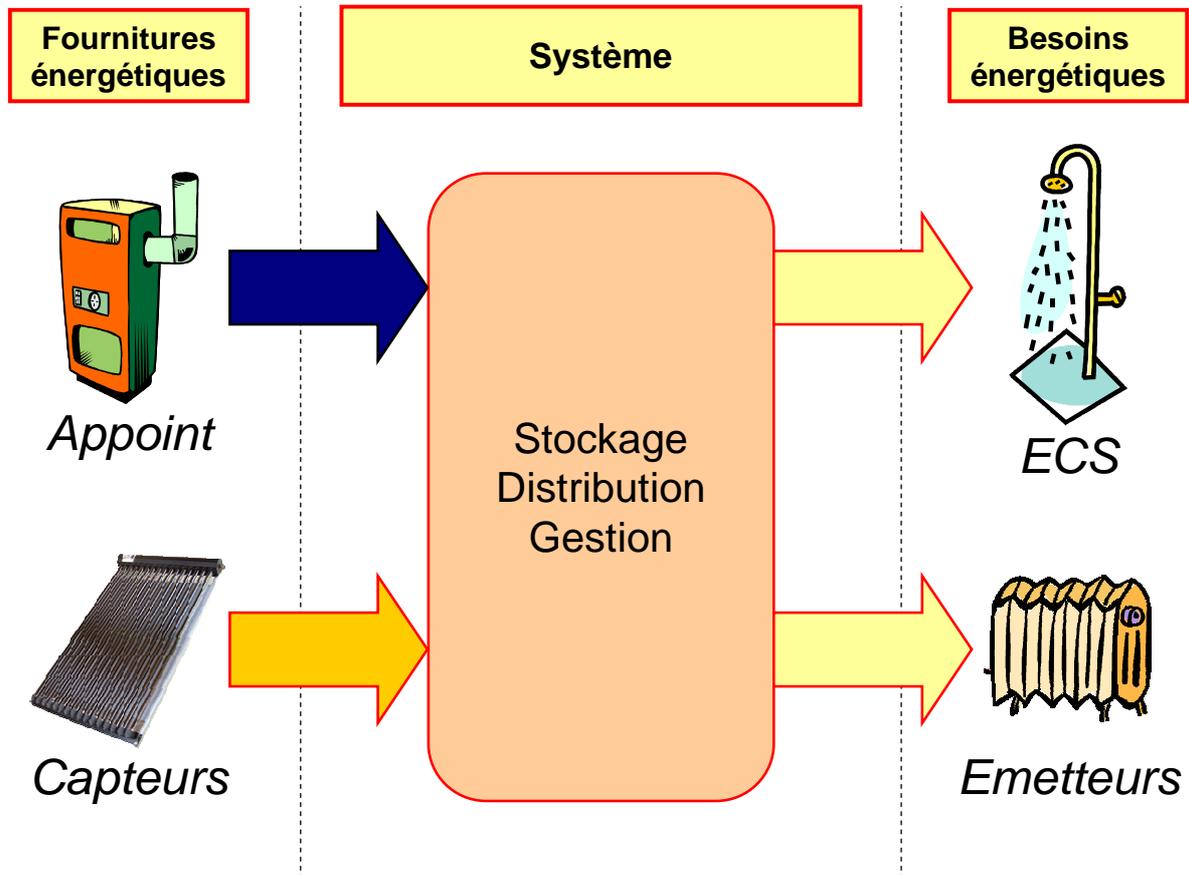


Figure 1-2 Représentation globale d'un SSC

1.1.1.2. Les principaux composants d'un SSC

Les différents éléments communs aux SSC sont présentés ci-dessous :

- Le capteur solaire thermique recueille l'énergie provenant du soleil et la transmet à un fluide caloporteur (très souvent un fluide antigel composé d'eau et de monopropylène-glycol). Lors de la conception d'un SSC, un des principes de base est de transférer un maximum d'énergie thermique du capteur vers le circuit utilisateur en faisant fonctionner le capteur solaire thermique au plus bas niveau de température possible pour optimiser son rendement (les pertes vers l'extérieur sont ainsi moindres, voir les modèles de capteur paragraphe 2.2.2.2). Il existe différents types de capteurs, plus ou moins adaptés à certains niveaux de températures. Plus le niveau de température est élevé, plus la technologie mise en œuvre est évoluée et coûteuse. Les catégories de capteurs utilisables dans l'habitat sont présentées dans le Tableau 1-1.

	Capteurs Sans vitrage	Capteurs plans vitrés	Capteurs à tubes sous vide
Photos			
Principe	Absorbeur à air libre	Vitrage pour réduire les pertes par convection et favoriser l'effet de serre Isolant pour limiter les pertes vers l'extérieur.	Vide pour réduire de manière importante les déperditions y compris à haute température
Avantages	Très simple à installer Peu coûteux (de l'ordre de 100€/m ²)	Structure simple et robuste Rapport performance/prix abordable Adaptés au chauffage de locaux et à l'ECS	Pertes thermiques réduites Adaptés pour des procédés à plus hautes températures (>80°C).
Inconvénients	Pertes thermiques importantes Uniquement adaptés aux procédés fonctionnant à une température proche de la température ambiante	Rendement modeste sous faible ensoleillement et écart de température relativement élevé (> 50°C)	Produit plus complexe entraînant un prix élevé (de l'ordre de 700 €/m ²)
Utilisation	[T<30°C] Chauffage piscine Préchauffage ECS	[20°C<T<70°C] Chauffage locaux Chauffage ECS	[60°C<T<150°C] Chauffage locaux Chauffage ECS Climatisation par absorption

Tableau 1-1 Principaux types de capteurs solaires utilisés dans le domaine de l'habitat

- La (ou les) source(s) d'énergie(s) d'appoint fournissent l'énergie nécessaire supplémentaire pour subvenir aux besoins de chaleur. Cette source d'énergie peut être de différent type (biomasse, gaz, fioul, électricité). En fonction de celle(s) retenue(s), les conditions de fonctionnement peuvent être très différentes. Par exemple, dans le cas d'une chaudière à condensation, il est indispensable de fonctionner avec une température de retour la plus basse possible pour profiter de l'effet de la condensation. En revanche, une chaudière à bois a besoin d'une température de retour élevée pour éviter les problèmes de corrosion et de dépôt liés

à la fumée de combustion. De plus, les commandes de chaque chaudière doivent varier en fonction de leur facilité à moduler leur puissance ou de fonctionner uniquement en marche/arrêt. Il existe une telle variété de SSC qu'il n'est pas possible de définir le meilleur système d'appoint. Généralement, le système d'appoint est dimensionné en puissance pour pouvoir couvrir à lui tout seul, l'ensemble des besoins de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire, en l'absence de ressource solaire. L'objectif pour un SSC est de faire appel le moins possible à son système d'appoint, et lors de son utilisation, de le faire fonctionner dans les meilleures conditions possibles pour optimiser le rendement énergétique global de celui-ci.

- L'émetteur de chaleur reçoit l'eau du réseau de chauffage pour réchauffer l'air ambiant. Pour favoriser un bon rendement de l'ensemble système, l'émetteur de chaleur doit fonctionner à basse température. Pour cela, la surface d'échange avec l'air ambiant doit être la plus grande possible. En général, les émetteurs de chaleur sont un circuit de radiateur ou un circuit de plancher chauffant. En fonction de la stratégie de stockage de chaleur du SSC (voir paragraphe 1.1.1.3 ci-dessous), le plancher chauffant peut également constituer un élément de stockage de l'énergie.

- Le système de stockage de chaleur joue le rôle de tampon pour stocker l'énergie solaire quand elle est disponible et la restituer lorsqu'il y a besoin de chaleur. Le stockage idéal serait inter-saisonnier pour obtenir une fraction solaire élevée, c'est-à-dire récupérer un maximum de chaleur en été pour la restituer en hiver. Mais pour réaliser un tel stockage avec les technologies actuelles, un volume trop important est nécessaire : plusieurs dizaines de m³ en utilisant de l'eau, un peu moins avec des matériaux à changement de phase. Un stockage par réaction chimique pourrait réduire considérablement le volume de ce stockage mais le coût des matériaux et les températures nécessaires aux réactions ont limité son développement. Ces verrous technologiques sont en cours d'étude pour débloquer la filière très prometteuse du stockage inter-saisonnier qui n'est pour l'instant pas très répandue. Un état de l'art sur les différents moyens de stocker la chaleur solaire pour les bâtiments à basse consommation a été réalisé lors de la Tâche 32 du programme SHC de l'IEA [Hadorn et al., 2005]. La plupart des SSC actuels possèdent un stockage de chaleur à plus court terme, entre 1 et 2 jours. En fonction de la stratégie de stockage du SSC (voir paragraphe 1.1.1.3 ci-dessous), le stockage de chaleur peut se faire soit via un réservoir hydraulique, soit directement par un plancher chauffant.

- L'ensemble de l'installation est géré par un ou des régulateurs qui assurent la commande des circulateurs et des vannes sur les différents réseaux hydrauliques. Les régulateurs peuvent être plus ou moins complexes, allant du simple contrôle différentiel sur chaque circuit, à la gestion globale des énergies employant des algorithmes évolués.

1.1.1.3. *Les principales stratégies de gestion de la chaleur*

Le type de stockage et de l'émetteur différencie deux grandes familles de SSC [Papillon et al., 2007] :

- La première famille de SSC stocke l'énergie solaire dans des réservoirs hydrauliques. Ce type de système est le plus répandu en Europe. Les volumes de stockage vont généralement de 500 à 1500 litres. Le principe est de stocker l'énergie solaire dès que possible dans un ou des ballons « tampons ». Lors du prélèvement

d'énergie, il est recommandé de maintenir au mieux la stratification de la chaleur dans le (ou les) ballon(s) pour améliorer le rendement du système. Une stratification bien maintenue permet de ménager une zone en partie haute à température suffisamment élevée pour l'ECS, et de conserver une partie basse plus froide favorable au bon fonctionnement du capteur. Pour cela, il existe des dispositifs actifs (piquages multiples avec vanne trois voies par exemple) ou passifs (canne de stratification interne par exemple).

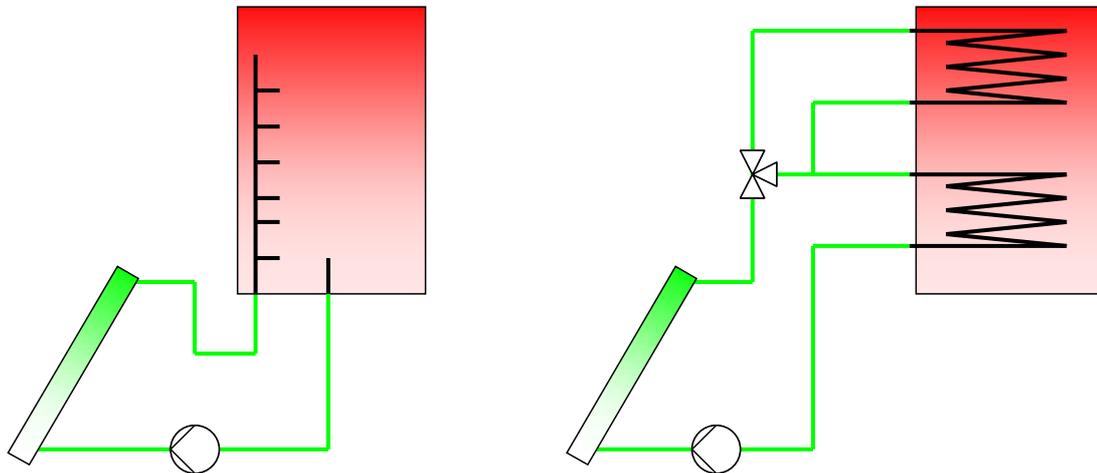
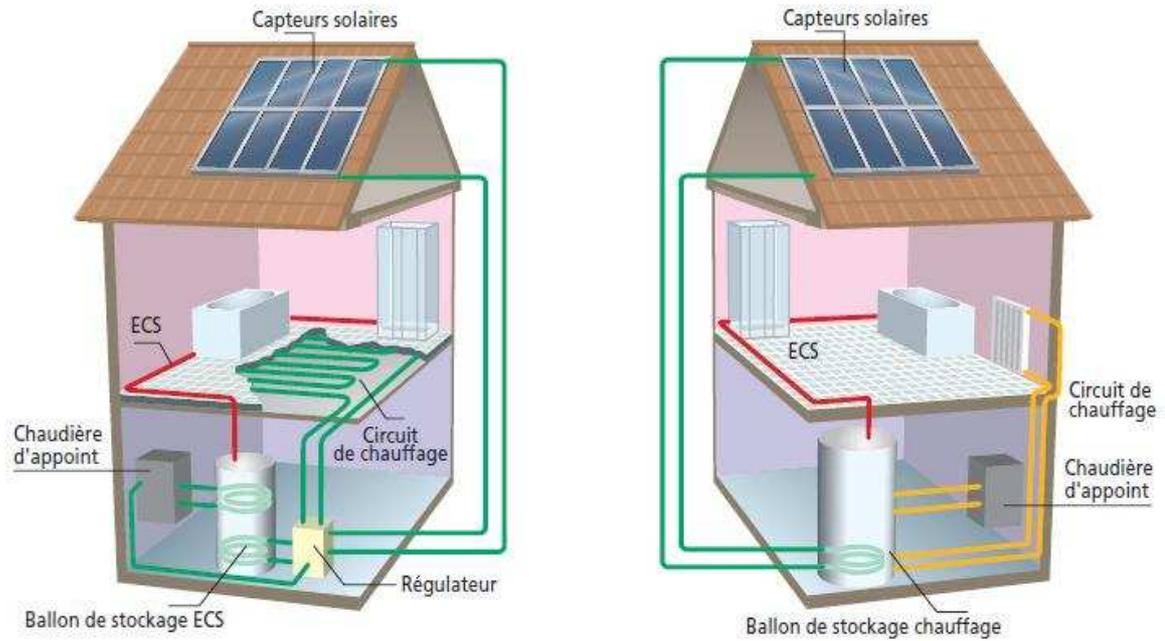


Figure 1-3 Schémas d'exemples de dispositifs pour le maintien de la stratification dans le ballon (à gauche, canne de stratification, à droite, vanne trois voies)

- La deuxième famille de SSC stocke l'énergie solaire dans la masse thermique du bâtiment. Par exemple, les Planchers Solaires Directs (PSD©) transfèrent directement l'énergie solaire pour le chauffage vers une dalle sans échangeur de chaleur ni stockage tampon intermédiaire. L'absence d'élément intermédiaire est favorable à un bon rendement d'installation. De plus, l'émission de chaleur par plancher chauffant est la plus confortable car elle ne crée que très peu de stratification de l'air ambiant dans la pièce. Lorsqu'il n'y a pas de besoins de chaleur pour le chauffage, l'énergie solaire est utilisée pour la production d'ECS. Le PSD s'est développé à la fin des années 70 en France et ne reste utilisé quasiment que dans ce pays. La dalle joue le double rôle de stockage et d'émetteur de chaleur basse température. Plus épaisse que pour un plancher chauffant classique, elle est surdimensionnée pour stocker l'énergie et la diffuser avec un certain déphasage. Un système de contrôle/commande spécifique est nécessaire dans ce cas pour gérer l'énergie solaire en direct avec la masse thermique tout en fournissant le confort nécessaire aux occupants et pour maximiser l'apport d'énergie solaire sans générer de température excessive dans le bâtiment.



En vert : circuit où circule l'antigel.
 En jaune : circuit où circule l'eau de chauffage (sans antigel).
 En rouge : circuit d'eau chaude sanitaire.
 Source : Ademe

Figure 1-4 Schéma représentant les deux stratégies possibles de stockage de la chaleur pour un SSC (Source : ADEME)

Type de stockage	Avantages	Inconvénients
Inertie thermique du bâtiment	Faibles dimensions Grande capacité de stockage Bonne efficacité thermique	Régulation complexe Difficulté de compréhension Un seul fabricant
Ballon d'eau chaude	Régulation simple Facile à comprendre Réalisé par la plupart des constructeurs	Pertes de stockage Grandes dimensions Performances faibles pour certains systèmes

Tableau 1-2 Comparaison globale entre les deux principales familles de SSC

Au sein des deux grandes familles présentées ci-dessus, différentes solutions ont été mises en place pour tenter de résoudre au mieux le problème de déphasage entre les besoins et la ressource solaire. La manière de gérer les différentes sources de chaleur pour approvisionner les besoins différencie les SSC. Il est possible de trouver plusieurs configurations par exemple :

- Stockage de la chaleur dans un seul ou plusieurs réservoirs pour le chauffage et l'ECS ;
- Raccordement de l'appoint séparé (l'énergie d'appoint ne transite pas par la cuve de stockage solaire), couplé (l'appoint fournit de l'énergie en partie haute de la cuve de stockage solaire) ou intégré (l'appoint est intégré à la cuve de stockage solaire) ;
- Assemblage de composants à façon (sur site) ou modules préfabriqués en usine ;

- Utilisation d'antigel ou vidange des capteurs en cas de risque de gel.

Il existe une grande variété de concepts hydrauliques et autant de régulations différentes pour la stratégie de gestion de la chaleur. C'est pourquoi un nombre important de typologies différentes de SSC existent : une vingtaine de systèmes génériques de SSC ont été répertoriés en Europe par l'IEA [Weiss et al., 2003]. Les types de composants des SSC sont globalement les mêmes. C'est la stratégie de gestion de la chaleur et du stockage qui va les différencier. Lors du projet Combisol [Thür et al., 2010], ont été retenus 6 schémas principaux représentatifs des systèmes actuellement disponibles sur le marché européen. D'un point de vue hydraulique, ils se différencient par leur manière de préparer l'ECS et d'utiliser l'énergie d'appoint (Tableau 1-3).

	Aux-Type 1 Appoint en chauffage connecté sur le retour de l'émetteur de chaleur	Aux-Type 2 Appoint en chauffage connecté directement sur le stockage
DHW-Type A « Tank in tank » pour l'ECS		
DHW-Type B Echangeur interne pour l'ECS		
DHW-Type C Echangeur externe pour l'ECS		

Tableau 1-3 Schémas des principaux SSC européens selon Combisol (Source : Combisol, 2010)

Parmi toutes ces stratégies de gestion de l'énergie dans le système, il n'y a pas forcément de meilleurs choix que d'autres. Une stratégie peut être plus adaptée à un climat et/ou à une habitation. Ceci vient du fait que les performances énergétiques d'un SSC sont assez complexes à définir car elles sont très variables (voir paragraphe 1.1.3.3 ci-dessous).

Il existe d'autres familles de SSC mais qui sont pour l'instant marginales et/ou en cours de développement. Il existe par exemple des systèmes utilisant l'air comme vecteur énergétique et stockant la chaleur dans des réservoirs enterrés remplis de galets. Ce genre de système n'est pas pris en compte dans le cadre de cette thèse.

1.1.2. Marchés du solaire thermique et des SSC

1.1.2.1. Le marché mondial du solaire thermique

Entre 2000 et 2008, le parc mondial d'installations solaires thermiques a connu une croissance très importante. Par exemple, selon le rapport du programme Solar Heating and Cooling (SHC) de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) [Weiss et Mauthner, 2010], la surface installée de capteurs plans vitrés sur l'année 2008 a été au moins 4 fois plus importante qu'en 2000, avec une croissance annuelle moyenne de l'ordre de 20% (voir Figure 1-5). Tous types de capteurs confondus, l'installation de systèmes solaires thermiques a augmenté de 35% entre 2007 et 2008, ce qui démontre une bonne dynamique de ce marché puisque cette augmentation n'était que de 19% entre 2006 et 2007.

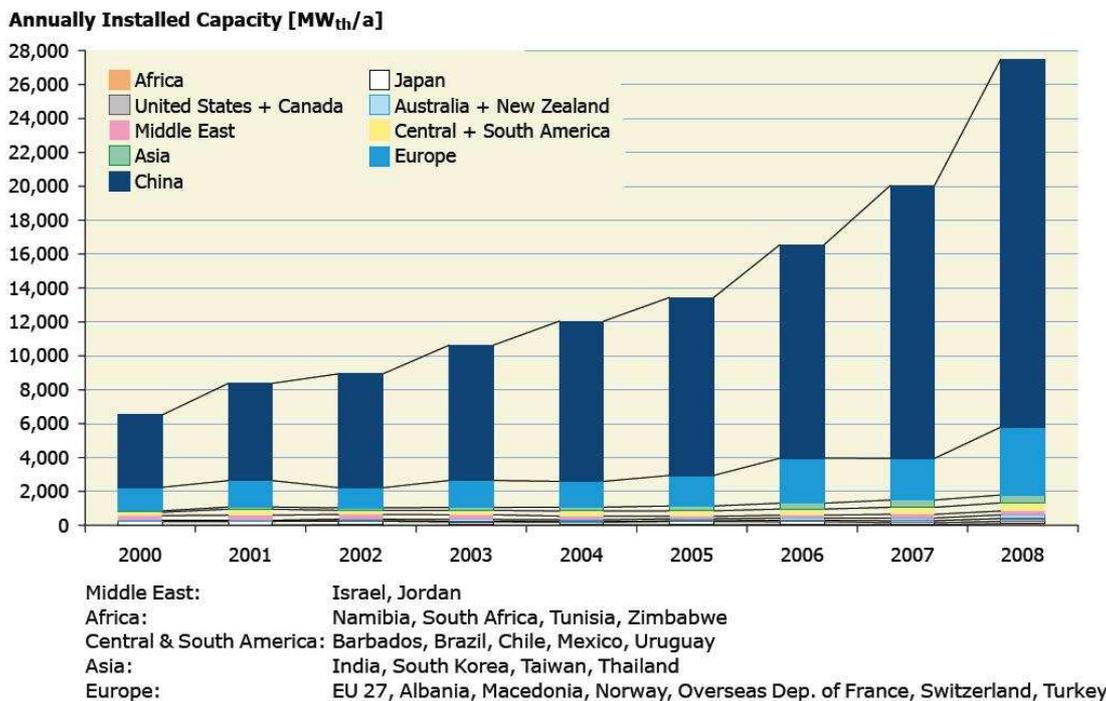


Figure 1-5 Capacité annuelle installée de capteurs plans et de tubes sous-vide entre 2000 et 2008 (Source : IEA SHC 2010)

Fin 2008, la puissance solaire thermique installée dans le monde était de 152 GW soit une surface équivalente d'environ 217 millions de m^2 . La production totale de chaleur des systèmes solaires en service dans les 53 pays de cette étude (représentant environ 90% du marché mondial du solaire thermique) s'élevait à 110

GWh, soit l'équivalent de 12,4 millions de tonnes de pétrole : l'utilisation de ces systèmes aurait ainsi permis d'éviter l'émission de 39,4 millions de tonnes de CO₂.

Les principaux marchés du solaire thermique se situent en Chine (87,5 GW), en Europe (28.5GW) et en Amérique du Nord (USA et Canada : 15,1 GW) (voir Figure 1-6). Par contre, l'utilisation de cette énergie diffère selon les pays. L'application dominante aux Etats-Unis est le chauffage de piscine par capteurs plastiques non-vitrés alors qu'en Chine et en Europe, les capteurs plans vitrés et les tubes sous vide sont plus largement utilisés pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage des bâtiments.

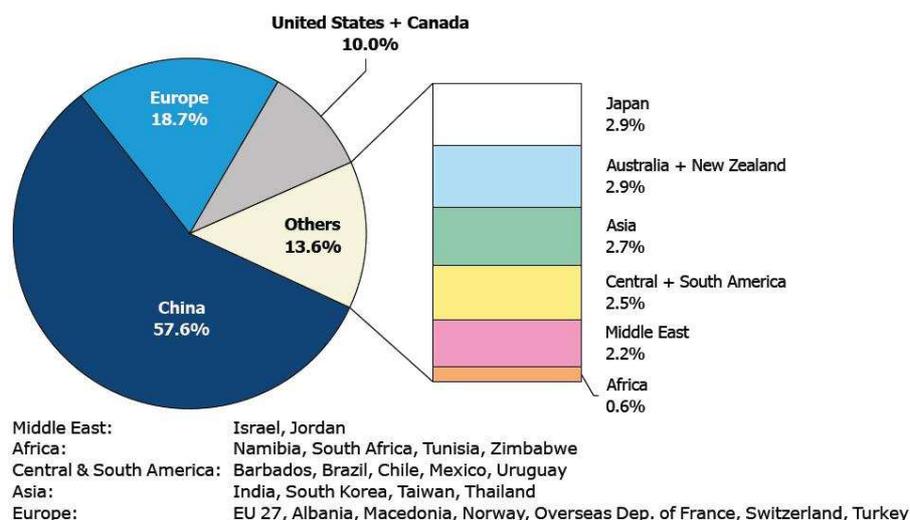


Figure 1-6 Répartition des installations totales de capteur (vitrés, non vitrés et à air) par région économique à la fin 2008 (Source : IEA SHC, 2010)

1.1.2.2. Le marché européen du solaire thermique

Après avoir suivi une croissance exceptionnelle de l'ordre de 60% en 2008, le marché européen du solaire thermique a diminué de 10% en 2009. Cependant, compte tenu de la situation économique actuelle, le marché s'est mieux comporté que ce que laissait prévoir l'ESTIF, la fédération des industriels européens du solaire thermique [ESTIF, 2010]. Finalement, pour la deuxième année consécutive, plus de 4 millions de m² de panneaux solaires thermiques se sont vendus en Europe, soit environ 3 GW installés⁷. Les perspectives pour 2011 restent incertaines tant que la crise financière et économique continue d'avoir un effet négatif à la fois sur les dépenses publiques et les incitations gouvernementales.

⁷ L'équivalence usuelle est de considérer que la puissance d'1 m² de capteurs est de 0.70 kW.

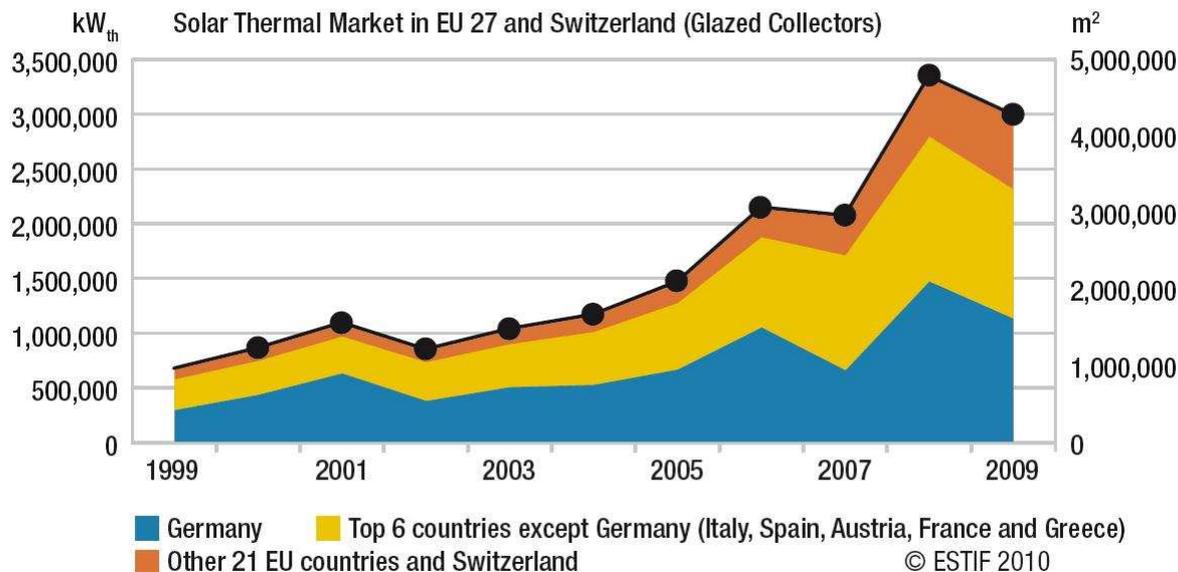


Figure 1-7 Evolution de la capacité installée de capteurs plans en Europe entre 1999 et 2009 (Source : ESTIF, 2010)

Toujours selon l’ESTIF, il y aurait actuellement plus de 31 millions de m² de capteurs plans en opération en Europe. Ce marché est largement dominé par l’Allemagne avec pratiquement 13 millions de m² de capteurs installés. La France représente un peu plus de 6% de la puissance européenne en solaire thermique.

1.1.2.3. Le marché français du solaire thermique

Entre 1998 et 2006, le marché du solaire thermique en France métropolitaine a progressé de près de 40 % par an. Il a ensuite connu une croissance moins soutenue en 2007 et 2008 avec environ 20 % d’augmentation. Le contexte économique peu favorable de l’année 2009 et 2010 a engendré une diminution du marché annuel de 14 %. En 2009, 185,5 MW (265000 m²) ont été installés en métropole et 49 MW (70000 m²) dans les DOM-TOM.

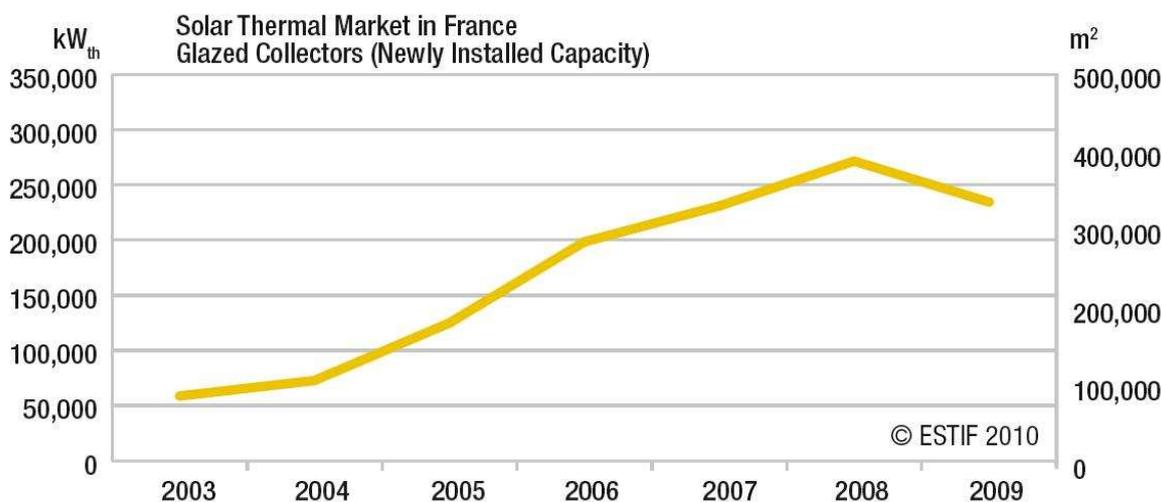


Figure 1-8 Evolution de la capacité installée de capteurs plans en France entre 2003 et 2009 (Source : ESTIF 2010)

En 1999 le marché du solaire thermique n'existait pratiquement pas. La France, par l'intermédiaire de l'ADEME, a lancé cette année là le « Plan Soleil » destiné à développer les filières les plus matures du solaire thermique dont les CESI et les SSC. Ce « Plan Soleil », qui s'est achevé en 2006, a permis un démarrage du marché des CESI en France. De quelques centaines d'installations en 2000, les ventes annuelles ont dépassé les 15 000 unités en 2005. La forte augmentation du marché à partir de 2005 correspond à la mise en place du crédit d'impôt de 40 % pour les particuliers, porté à 50 % pour la période 2006/2009, auquel s'ajoutent des aides à l'investissement au niveau régional et de plus en plus au niveau local. Le système de soutien français est ainsi devenu, en quelques années, un des plus attractifs de l'Union Européenne. L'autre particularité du marché français tient à son développement plus important que chez ses voisins du solaire thermique collectif. Le dispositif « Fonds Chaleur » lancé en 2009 a déjà permis de soutenir financièrement les projets de solaire collectif et de contribuer à la croissance de ce marché.

Malgré ces dispositions, le marché a diminué en 2009, et à nouveau en 2010 avec un secteur résidentiel profondément touché par la crise économique et une forte concurrence d'autres technologies dans le domaine des énergies renouvelables, en particulier le solaire photovoltaïque. Ainsi, l'installation de CESI a diminué de 14% et celle des SSC de 56% par rapport à 2008. Néanmoins, ce secteur sera amené à se développer davantage ces prochaines années avec notamment la mise en place de la future réglementation thermique 2012. L'énergie solaire thermique sera déterminante pour l'octroi des labels BBC par exemple, qui sera imposé à toute nouvelle construction à la fin 2012 selon le Grenelle de l'Environnement [Grenelle, 2009].

1.1.2.4. *Le marché du SSC, en France et ailleurs*

Malgré la légère inflexion de 2009, le marché du solaire thermique semble très prometteur. La diffusion des SSC devrait profiter de cette dynamique d'autant plus que ce genre de système permet de réaliser des économies très importantes. D'après le projet Solcombi2 [Letz, 2006], lancé par l'ADEME en 2007 et qui a permis le suivi d'une vingtaine d'installations, un système qui fonctionne bien permet une économie d'énergie de l'ordre de 300 à 500 kWh par an et par m² de capteur installé, soit sensiblement plus que pour les CESI (autour de 200 kWh.m⁻² par an). Les taux d'économie d'énergie générés par les SSC s'échelonnent entre 10 et 50 %, voire plus dans certains cas très favorables. Pourtant, le marché des SSC reste marginal aujourd'hui en France comme le montre la Figure 1-9 ci-dessous.

CHAPITRE 1

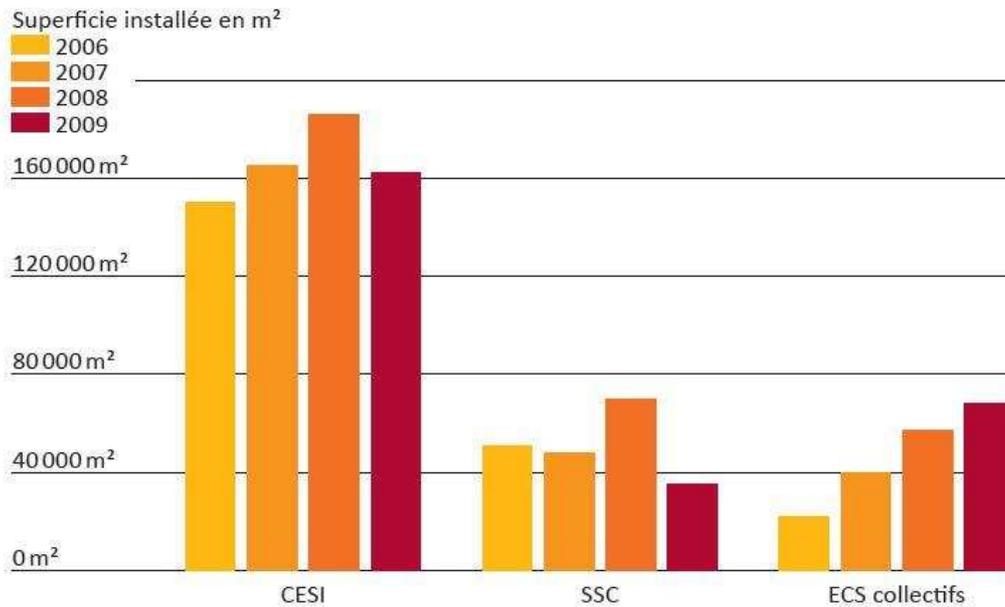


Figure 1-9 Répartition des installations posées par technologie entre 2006 et 2009 (Source : Syndicat des Energies Renouvelables)

Ceci est globalement le cas sur le marché mondial où la plupart des applications du solaire thermique sont principalement orientées vers la production d'ECS. Seules l'Autriche et l'Allemagne voient leurs applications se diversifier un peu plus vers le chauffage solaire.

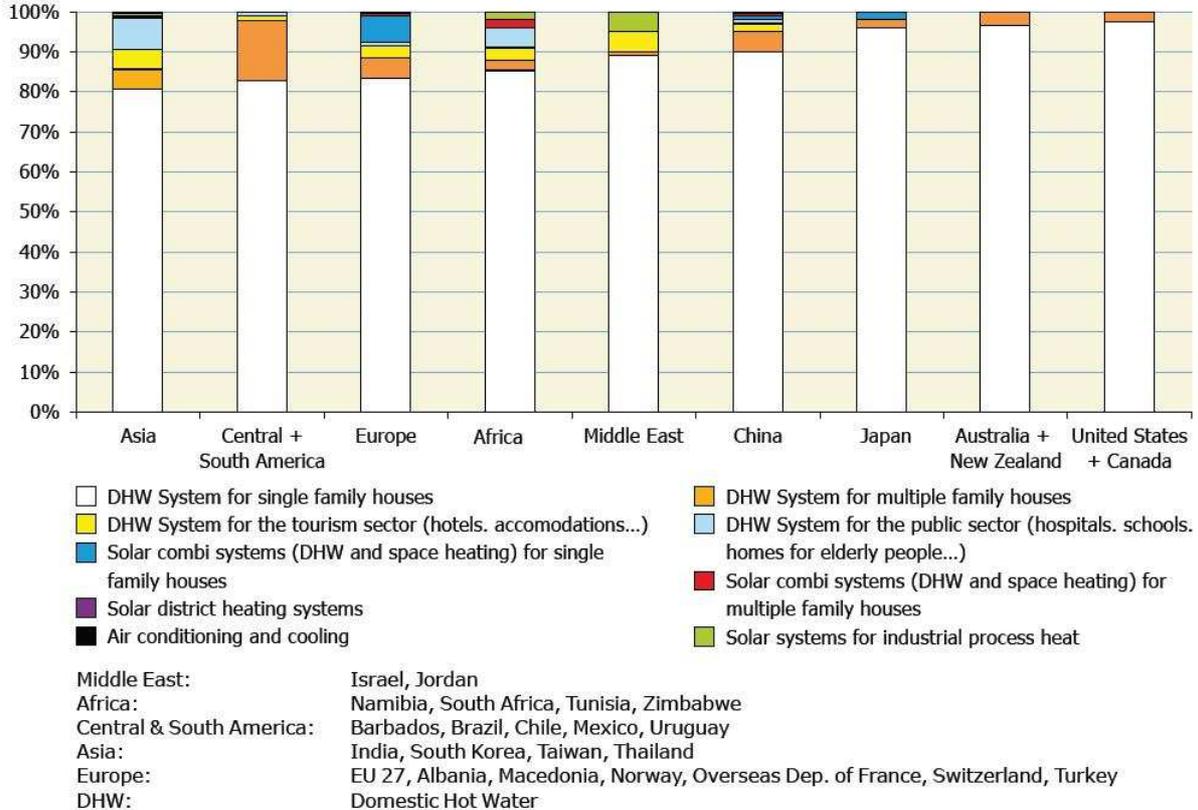


Figure 1-10 Distribution des différentes applications de la capacité totale de capteurs plans et de tubes sous-vide installés par région économique en 2008 (Source : IEA SHC)

Ce retard vient principalement du fait que les SSC sont des systèmes plus complexes que les CESI, en raison de l'interaction de plusieurs « sous-systèmes » : chauffage, ECS, solaire, appoint. Dans les années 80, les premiers systèmes solaires thermiques dédiés à la fois à l'ECS et au chauffage, arrivant sur le marché étaient des systèmes ultra-complexes, conçus au cas par cas. Puis, dans les années 90, l'industrie propose de nouveaux systèmes, moins chers et plus simples, mais résultant plus d'expériences de terrains que de réelles optimisations basées sur des connaissances scientifiques. De plus, certaines mauvaises expériences d'installations défectueuses ont renforcé l'image des SSC comme étant des systèmes à risque en termes d'investissement. Le principal frein au développement du marché des SSC vient d'un manque de confiance des éventuels utilisateurs et des craintes des installateurs, alimentés par un manque d'informations fiables et claires sur le potentiel des SSC.

1.1.2.5. Les labels et certifications des CESI et des SSC

Pour comparaison, les acteurs du domaine des CESI en France disposent déjà un panel d'outils garantissant une bonne installation et un bon fonctionnement de ces systèmes. Par exemple, l'association Qualit'EnR, fondée en 2006 pour assurer la qualité d'installation des systèmes à énergies renouvelables, gère les appellations Qualisol pour certifier la bonne qualité d'installation des systèmes solaires thermiques de type CESI. Au niveau de la qualité des produits, le référentiel NF CESI [Certita, 2010] pour les chauffe-eau solaires individuels à circulation forcée permet de garantir les bonnes performances des systèmes complets. Il se base sur la norme ISO 9459 qui permet de caractériser les performances de l'ensemble du système aux moyens d'essais. A l'échelle européenne, la certification Solar Keymark, développé par l'ESTIF et le CEN, avec le soutien de la commission européenne, atteste la conformité des produits à des normes européennes. Il s'applique principalement aux capteurs et aux CESI préfabriqués en usine. Les CESI assemblés à façon et les SSC ne sont pas couverts par la Solar Keymark.



Figure 1-11 Exemple de trois labels de certification pour l'installation et le fonctionnement des CESI (de gauche à droite : Qualisol, NF CESI et le Solar Keymark)

En ce qui concerne les SSC, une extension de l'appellation Qualisol, appelée Qualisol Combi, permet de valoriser les compétences de certaines entreprises en SSC. La marque Ô Solaire, créée par Enerplan, association réunissant les industriels de la filière solaire thermique française, vise à sélectionner des systèmes solaires domestiques (notamment SSC) dans une démarche de qualité. Une des règles est l'approche « système » qui consiste à proposer aux utilisateurs un kit complet pour améliorer le fonctionnement et la qualité d'installation.

Ces pistes vont vers une amélioration de l'information de la qualité des SSC pour les utilisateurs mais il n'existe toujours pas à ce jour de réelle norme ou certification permettant de caractériser les performances de SSC. L'une des raisons est la difficulté à les estimer car elles dépendent de nombreux paramètres (voir paragraphe 1.1.3.3 ci-dessous). Les outils permettant de caractériser ces systèmes de manière rigoureuse font actuellement cruellement défaut. Devant une offre de matériels abondante (plus de 40 marques et 1400 produits référencés Ô Solaire⁸ pour les SSC), les utilisateurs potentiels se trouveraient moins démunis pour faire un choix éclairé s'il existait un test reconnu au niveau français et/ou européen, et, encore mieux, un étiquetage des performances énergétiques.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire tentent d'œuvrer pour l'amélioration de l'information concernant les SSC en proposant une méthode fiable capable de caractériser leurs performances.

1.1.2.6. Les perspectives pour le marché du solaire thermique

Une standardisation est maintenant nécessaire pour le bon développement du marché des SSC. Dans une étude prospective, l'ESTIF estime qu'en 2050, l'énergie solaire thermique pourrait couvrir 50% des besoins en chaleur de l'Europe, ce qui veut dire qu'une grande majorité des bâtiments disposant d'un potentiel solaire suffisant serait équipé en technologie solaire thermique [Weiss et Biermayr, 2009]. Le premier objectif est de mettre en opération 1m² de capteur par habitant d'ici 2020, avant de passer à 8m² par habitant en 2050 (soit une capacité installée de 2576 GW, dans un scénario politiquement favorable, voir Figure 1-12).

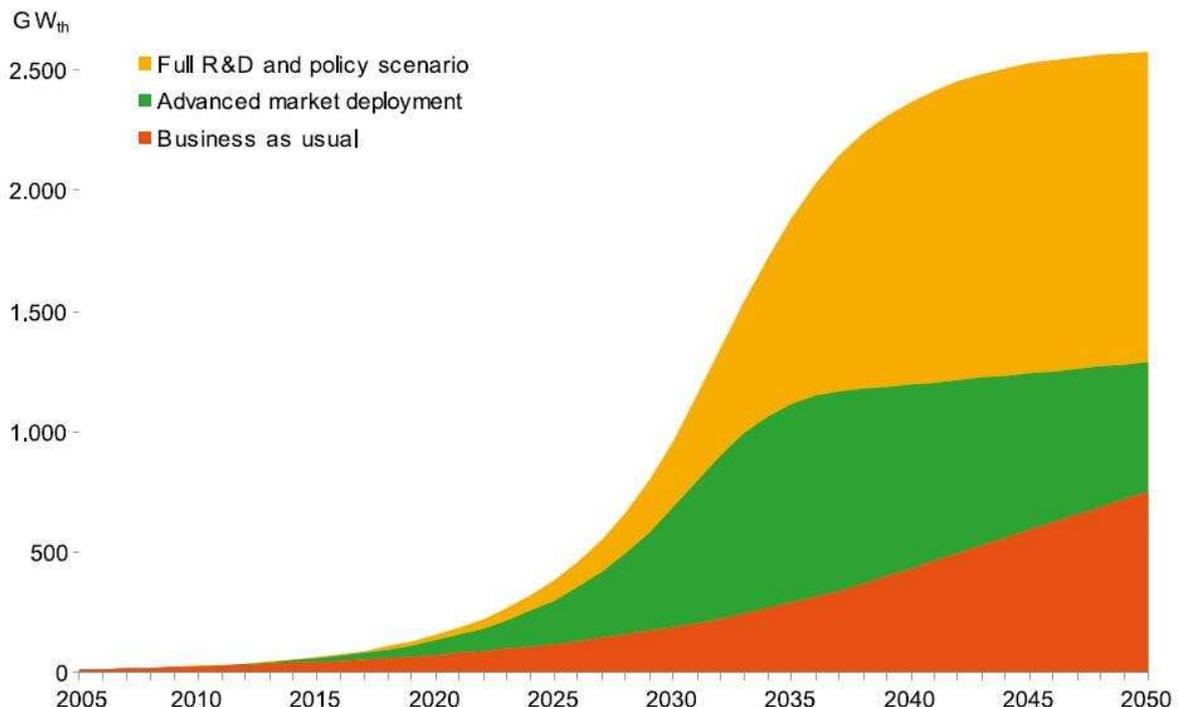


Figure 1-12 Croissance de la puissance solaire thermique utilisée pour différents scénarios (Source : ESTIF 2008)

⁸ <http://www.o-solaire.fr/index.php?page=21>, accès le 06/06/2011

Par ailleurs, l'ESTTP, la plateforme technologique européenne du solaire thermique, maintenant intégrée dans la plateforme technologique Renewable Heating and Cooling, dans sa vision des perspectives européennes, définit les tendances et perspectives technologiques ainsi qu'une feuille de route pour atteindre ces objectifs [ESTTP, 2010]. Dans celle-ci figure la certification Keymark des SSC ainsi que la généralisation de la Garantie de Résultats Solaires (GRS⁹) à moyen terme (2020). En corollaire, cela signifie qu'il est indispensable de disposer d'une méthode de caractérisation des performances des SSC reconnue. Nos travaux portent donc sur une étape clé du développement de l'énergie solaire thermique.

1.1.3. Performances des SSC et caractérisation

1.1.3.1. Comment évaluer les performances d'un SSC ?

Il existe plusieurs critères de performances qui reflètent différents aspects du fonctionnement d'un SSC. Les critères définis ci-dessous utilisent les variables présentés sur la Figure 1-13.

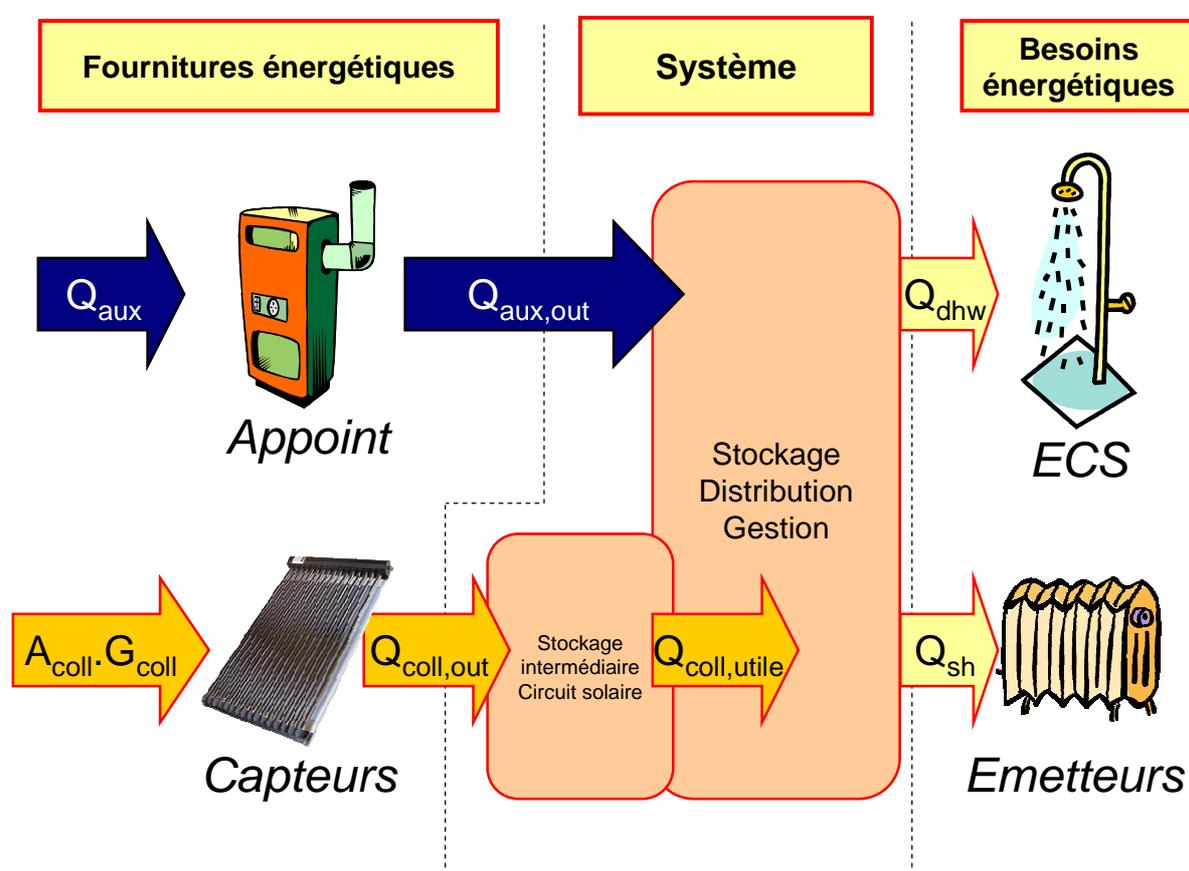


Figure 1-13 Schéma global de SSC montrant les principales grandeurs utiles aux calculs des critères de performances

- Le taux de couverture solaire (ou également appelée fraction solaire)

Le taux de couverture solaire (souvent appelé par abus de langage fraction solaire) est le rapport entre l'énergie fournie par la partie solaire d'une installation et la

⁹ La Garantie de Résultats Solaires (GRS) se traduit par un engagement des opérateurs techniques à ce que le système installé fournisse un niveau minimal d'énergie thermique d'origine solaire.

CHAPITRE 1

fourniture totale d'énergie de l'installation (définition selon la norme internationale [ISO9488, 1999]).

$$F_s = \frac{Q_{coll,utile}}{Q_{sh} + Q_{dhw}} \quad (1-1)$$

Il est possible de retrouver dans certains cas le taux de couverture solaire exprimé à l'aide des énergies en entrée de stockage.

$$F_s = \frac{Q_{coll,utile}}{Q_{coll,utile} + Q_{aux,out}} \quad (1-2)$$

Dans ces calculs, $Q_{coll,utile}$ représente l'énergie fournie en toute fin de la partie solaire. Les pertes aux niveaux des canalisations et des éventuels stockages intermédiaires ne sont pas prises en compte dans le calcul de ce critère.

Le taux de couverture traduit la récupération de l'énergie solaire mais il ne montre pas si l'énergie solaire est bien récupérée, c'est à dire si l'installation solaire est utilisée de manière optimale. En effet, augmenter la surface de capteur permettrait d'obtenir un très bon taux de couverture mais ceci va augmenter le coût de la production solaire. Un autre critère tel que la productivité permet de contrebalancer les inconvénients du taux de couverture et de fournir des informations complémentaires sur les performances du système.

- La productivité solaire

La productivité représente une quantité d'énergie délivrée rapportée à la surface de capteur solaire. Pour enlever toute ambiguïté, il faut préciser à chaque fois :

- Quelle énergie est représentée : énergie utile, énergie sortant des capteurs, énergie solaire entrant dans le ballon ou l'énergie économisée à l'entrée de l'appoint ;
- Pour quelle surface de capteur : surface hors tout, surface d'entrée ou surface d'absorbeur.

$$Prod = \frac{Q}{A_{coll}} \quad (1-3)$$

Ce critère reflète la qualité d'utilisation de la partie solaire et du dimensionnement des capteurs. Une productivité trop faible témoigne probablement du surdimensionnement de la surface des capteurs.

Lorsque l'on fait varier les besoins ou la surface des capteurs, productivité et taux de couverture varient en sens inverse. Par exemple, si pour une surface de capteur donnée, l'ensemble des besoins diminue, la productivité diminue également, mais le taux de couverture augmente. Le dimensionnement de la partie solaire d'un système résulte en fait d'un compromis entre ces deux indicateurs.

Taux de couverture et productivité se complètent pour donner une information sur la performance de la partie solaire du système. Le problème est que la qualité de son fonctionnement global n'est pas forcément représentée. Par exemple, un ballon de stockage mal isolé peut faire augmenter à la fois la productivité et le taux de couverture tout en entraînant une consommation d'énergie primaire plus importante. Un bon système n'est pas forcément un système qui maximise l'apport solaire mais plutôt celui qui économise le plus possible d'énergie d'appoint.

1.1.3.2. *Le taux d'économie d'énergie*

Le critère qui semble le plus pertinent est le taux d'économie d'énergie. Ce nombre adimensionnel permet de comparer l'économie d'énergie d'appoint apportée par le SSC en comparaison avec une installation conventionnelle de « référence », sans apport solaire, qui aurait fournie la même quantité d'énergie. Il est calculé au niveau de l'énergie finale consommée.

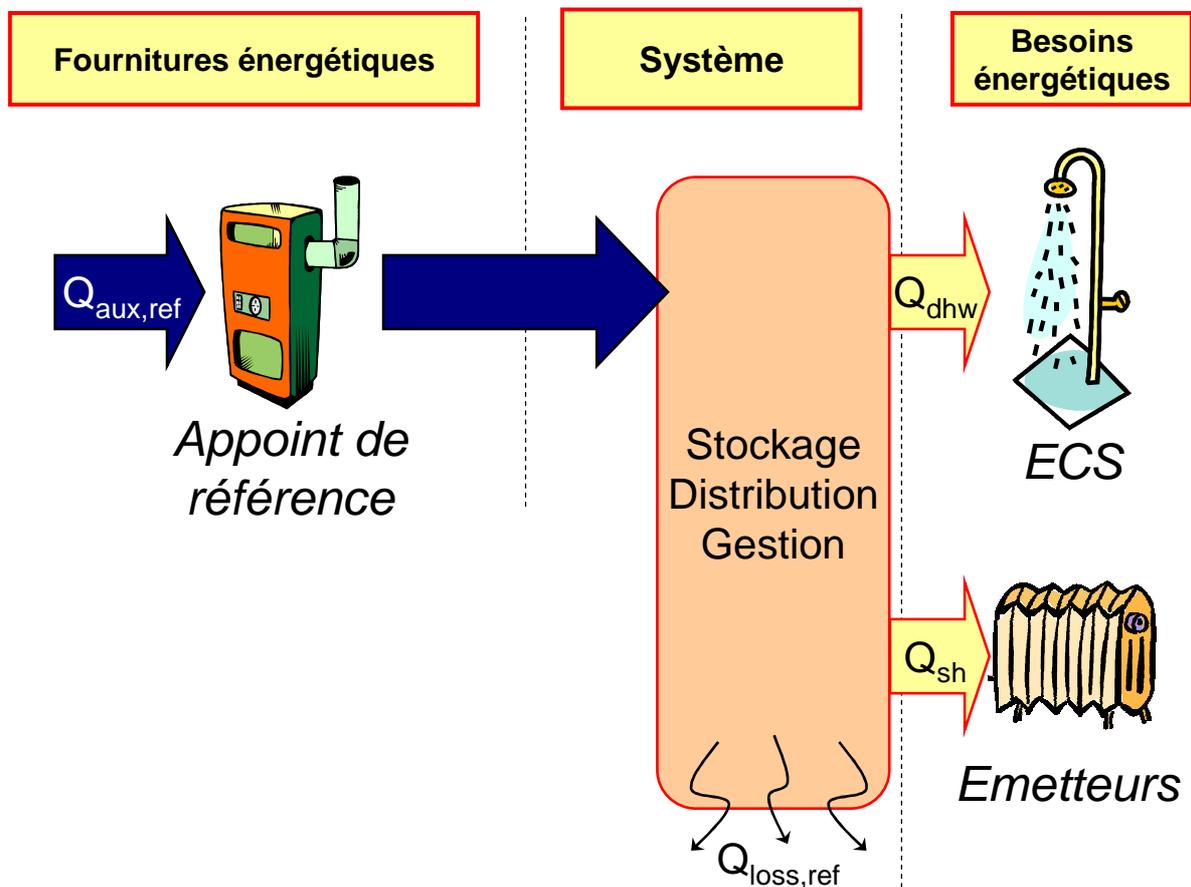


Figure 1-14 Schéma global de l'installation de référence montrant les principales grandeurs utiles aux calculs des critères de performances

Un des problèmes est de définir le système de référence. Il n'existe pas encore de consensus européen à ce sujet. Il est néanmoins possible de définir la consommation énergétique de référence de la manière suivante :

$$Q_{aux,ref} = \frac{Q_{sh} + Q_{dhw} + Q_{loss,ref}}{\eta_{aux,ref}} \quad (1-4)$$

CHAPITRE 1

Aucun stockage de chaleur pour le chauffage n'est considéré dans le système de référence. Les pertes du ballon ECS de référence, $Q_{loss,ref}$, peuvent être définies par l'équation (1-6).

$$\dot{Q}_{loss,ref} = (UA)_{store,ref} (T_{store} - T_{amb,store}) \quad (1-5)$$

Le volume du stockage est défini comme étant égal 0,75 fois le puisage quotidien. En suivant la norme [CEN/TS12977-1, 2010], le coefficient de pertes de ce ballon peut être décrit de la manière suivante :

$$(UA)_{store,ref} = 0.16 \sqrt{V_{store,ref} / 1000} \quad (1-6)$$

En considérant une température de ballon moyenne de 52,5°C sur l'année, une température d'ambiance du local abritant le ballon de stockage, fixe de 15°C et un puisage quotidien de 200 litres, les pertes de références sont de 644kWh sur l'année. Cette valeur est celle retenue dans les différentes études de la Tâche 26 de l'IEA.

L'énergie du système de référence est supposée être fournie par une chaudière ayant un rendement annuel $\eta_{aux,ref}$ de 85%.

A partir de la définition générale du taux d'économie d'énergie, il est possible de définir plusieurs fonctions, prenant en compte de manière plus ou moins complète les énergies intervenant au sein du SSC (thermique, électrique, pénalités de confort).

- Taux d'économie d'énergie thermique

Cet indicateur est par définition la fraction d'énergie économisée par le SSC par rapport au système de référence.

$$f_{sav,th} = \frac{Q_{aux,ref} - Q_{aux}}{Q_{aux,ref}} = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_{aux,ref}} \quad (1-7)$$

- Taux d'économie d'énergie étendue

Cet indicateur intègre non seulement les énergies thermiques mises en jeu, mais également les énergies électriques consommées par les auxiliaires (pompes, vannes, brûleur et autres appareils électroniques, ...).

$$f_{sav,ext} = 1 - \frac{Q_{aux} + \frac{W_{par}}{\eta_{el}}}{Q_{aux,ref} + \frac{W_{par,ref}}{\eta_{el}}} \quad (1-8)$$

W_{par} est l'énergie électrique auxiliaire, utilisée pour faire fonctionner le système. η_{el} est le rendement de conversion de l'énergie primaire en énergie électrique pris à 40% quelque soit le cas.

- Indicateur de taux d'économie

Cet indicateur inclut une pénalité en cas de non respect des critères de confort sur les températures de consignes pour l'ECS et l'air intérieur. Afin de pouvoir être intégré dans les calculs de performance, cette pénalité est arbitrairement transformée en « énergie de pénalité » qui s'exprime de la manière suivante :

$$Q_{penalty,red} = Q_{penalty,sh} + Q_{penalty,dhw} - Q_{penalty,ref} \quad (1-9)$$

La « puissance de pénalité » pour l'ECS intervient lorsque la température fournie par le système est inférieure à la consigne.

$$\dot{Q}_{penalty,dhw} = \dot{m}_{dhw} \cdot c_{p,wat} \cdot \left[\max(0; T_{set,dhw} - T_{dhw}) + \left(\max(0; T_{set,dhw} - T_{dhw}) + 1 \right)^{x_{dhw}} - 1 \right] \quad (1-10)$$

Cette « puissance de pénalité » se décompose en deux termes :

- Le premier terme de l'équation (1-10) compense l'énergie « non fournie » par le système du fait de la température trop faible ;
- Le deuxième terme de l'équation ajoute une pénalité traduisant la non-satisfaction du confort souhaité. Cette pénalité est exponentielle. Si la valeur de l'exposant x_{dhw} est grande, des écarts importants de température par rapport à la consigne seront beaucoup plus pénalisés que les petits écarts. Pour harmoniser la fonction de pénalité quand $(T_{set,dhw} - T_{dhw}) < 1$ et la rendre monotone par rapport à x_{dhw} , la valeur 1 est ajoutée à l'opérande de l'exposant puis soustraite à la fonction globale pour assurer sa continuité.

La « puissance de pénalité » pour le chauffage intervient lorsque la température intérieure descend en dessous de 19,5°C ou passe au dessus de 24°C (ces formules ont été mises en place lors de la Tâche 26 où la température intérieure de consigne a été fixée à 20°C). Le raisonnement pour la mise en place de ces « puissances de pénalité » est globalement le même que pour l'ECS.

$$\dot{Q}_{penalty,sh} = \begin{cases} (UA)_{building} \left((19.5 - T_{room}) + (19.5 - T_{room} + 1)^{x_{sh}} - 1 \right) & \text{si } T_{room} < 19.5^\circ C \\ 0 & \text{si } 19.5^\circ C \leq T_{room} \leq 24^\circ C \\ (UA)_{building} \left((T_{room} - 24 + 1)^{x_{sh}} - 1 \right) & \text{si } T_{room} > 24^\circ C \end{cases} \quad (1-11)$$

L'énergie de pénalité de référence est calculée par le biais de simulations du système de référence, défini dans la Tâche 26 [Weiss, 2003]. Ces énergies sont calculées seulement lors des surchauffes estivales ($T_{room} > 24^\circ C$) et sont retranchées aux pénalités de chauffage du système pour éliminer l'influence des surchauffes estivales inévitables, dues aux apports solaires passifs.

Les exposants utilisés lors de la Tâche 26 ont été arbitrairement fixés à 4 pour x_{dhw} et 2 pour x_{sh} .

Finalement, l'indicateur de fraction solaire s'exprime de la manière suivante :

$$f_{si} = 1 - \frac{Q_{aux} + \frac{W_{par}}{\eta_{el}} + Q_{penalty,red}}{Q_{aux,ref} + \frac{W_{par,ref}}{\eta_{el}}} \quad (1-12)$$

L'intérêt de cet indicateur est surtout de pénaliser fortement des systèmes, qui au prétexte d'économiser l'énergie, n'assureraient pas la satisfaction des besoins de chauffage et d'ECS demandés.

1.1.3.3. Caractérisation des performances : la méthode FSC

Les performances des SSC sont très difficiles à caractériser du fait de leur forte dépendance au climat et à la demande énergétique du bâtiment. Par exemple, un même SSC n'aura pas la même performance s'il est installé dans une maison bien isolée à Barcelone ou dans une maison mal isolée à Stockholm. Les systèmes peuvent être plus ou moins adaptés à certains climats ou à certains types de bâtiment. Par conséquent, il est difficile de les comparer entre eux. Cette comparaison est d'autant plus difficile qu'ils ne sont pas forcément installés avec les mêmes surfaces de capteurs.

Pour surmonter ce problème, une méthode a été proposée dans le cadre de la Tâche 26 du programme SHC de l'IEA, permettant de caractériser les performances des SSC à l'aide d'une simple courbe, caractéristique uniquement du système [Letz et al., 2009]. Cette méthode permet ainsi de comparer très simplement leurs performances, dans n'importe quel contexte énergétique. Elle se base sur la définition d'un nombre adimensionnel : la Fraction Solarisable des Consommations (*FSC*).

L'idée première de cette méthode est de pouvoir comparer le taux d'économie d'énergie $f_{sav,th}$ (ou $f_{sav,ext}$) d'un SSC au taux d'économie d'énergie maximum théorique qu'il serait possible si le système était parfait (sans aucune pertes). Pour cela, on doit comparer l'évolution sur l'année de l'énergie de référence $Q_{aux,ref}$ et de l'énergie solaire reçue sur la surface des capteurs. La Figure 1-15 représente ces évolutions mensuelles.

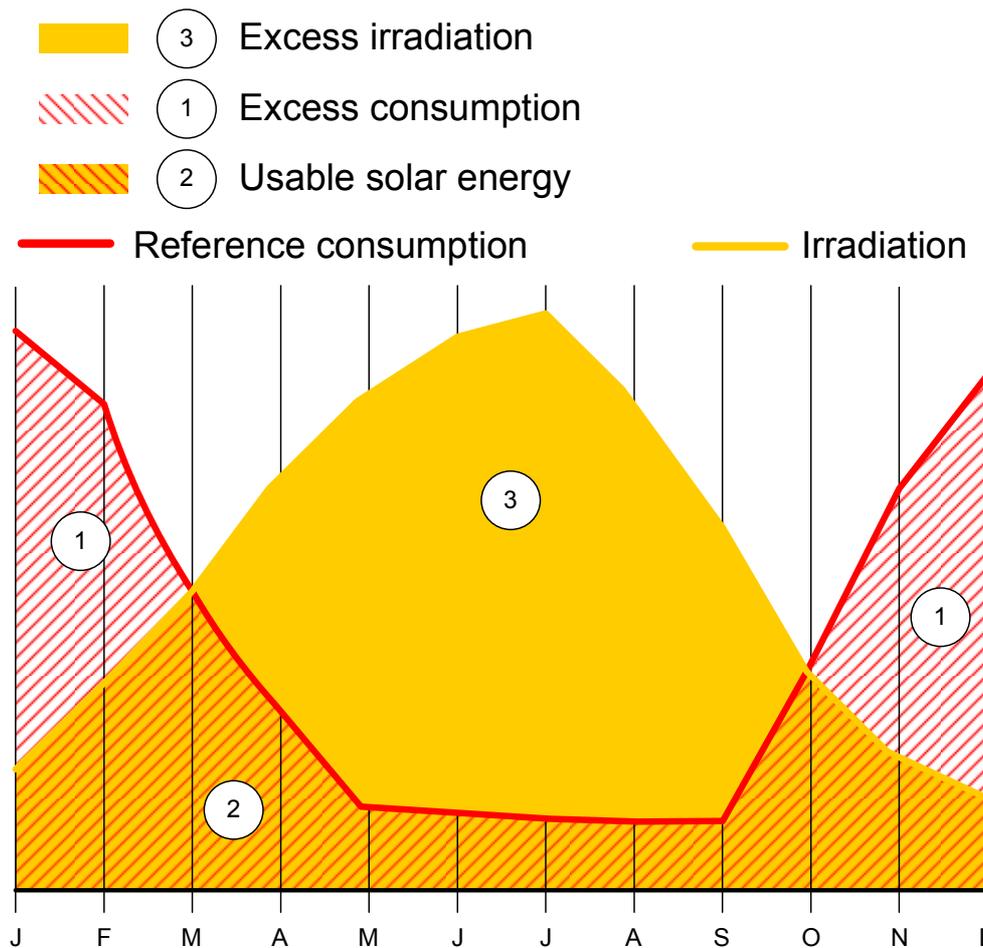


Figure 1-15 Comparaison des évolutions mensuelles de la consommation du système de référence et de l'énergie solaire arrivant sur la surface des capteurs du SSC étudié (Source : IEA SHC)

A partir de la Figure 1-15, il est possible de définir 3 zones :

- La zone 1 représente l'énergie de consommation de référence qui ne peut être couverte par l'énergie solaire disponible ;
- La zone 2 représente l'énergie qui pourrait être économisée grâce à l'énergie solaire ;
- La zone 3 représente l'énergie solaire excédentaire qui ne pourra pas être valorisée.

Il est alors possible de calculer l'énergie solaire récupérable au maximum sur une année. Elle est représentée par la zone 2.

$$Q_{solar,usable} = \sum \min(Q_{aux,ref}; A_{coll} \cdot G_{coll}) \quad (1-13)$$

Dans la Tâche 26, l'énergie solaire « utilisable » $Q_{solar,usable}$ est calculée sur la base d'une somme de valeurs mensuelles.

CHAPITRE 1

Le nombre FSC est obtenu en divisant $Q_{solar,usable}$ (zone 2) par l'énergie de référence du bâtiment $Q_{aux,ref}$ (zone 1 + zone 2). Il peut être considéré comme étant le taux d'économie d'énergie maximum théorique atteignable.

$$FSC = \frac{Q_{solar,usable}}{Q_{aux,ref}} \quad (1-14)$$

Contrairement au f_{sav} , cet indicateur ne dépend pas du système étudié mais fait uniquement référence à l'énergie solaire reçue dans le plan des capteurs (fonction du climat et de la surface des capteurs) ainsi que la demande énergétique (consommation ECS, climat et type de bâtiment). La comparaison entre f_{sav} et FSC donne une bonne indication de l'efficacité d'un SSC : plus f_{sav} est proche de FSC , mieux le système convertit l'énergie solaire reçue en économie d'énergie.

En étudiant la relation entre f_{sav} et FSC par le biais de nombreuses simulations numériques détaillées de systèmes, les acteurs de la tâche 26 ont obtenu une courbe de régression caractéristique.

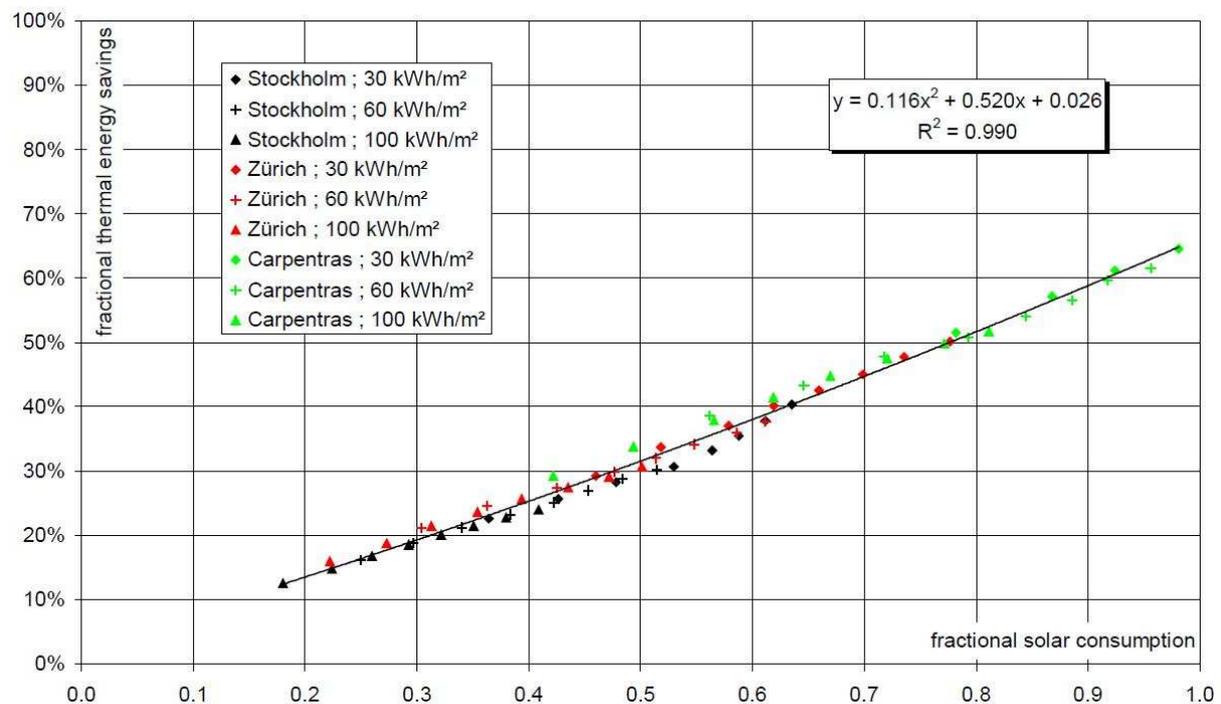


Figure 1-16 Taux d'économie d'énergie thermique $f_{sav,th}$ en fonction de la Fraction Solarisable de Consommation FSC pour un système simulé avec PSD-MI (Source : IEA SHC)

Ainsi, il serait possible de caractériser le taux d'économie d'énergie d'un système f_{sav} en fonction de l'indicateur FSC , à l'aide d'une simple parabole, avec un facteur de régression proche de 1.

$$f_{sav} = a + b.FSC + c.FSC^2 \quad (1-15)$$

A l'instar de la méthode f-Chart décrite dans [Duffie et Beckman, 2006], il est possible d'ajuster la précision de ces courbes en complétant les formules à l'aide d'un facteur de correction SC prenant en compte le ratio volume de stockage/surface des capteurs (soit V_{store}/A_{coll} , exprimé ici en $L.m^{-2}$ dans l'équation (1-16)). La correction est définie par l'équation (1-17).

$$SC = \left(\frac{V_{store}}{\alpha.A_{coll}} + \beta \right)^{\gamma} - \gamma(1 + \beta)^{(\gamma-1)} \left(\frac{V_{store}}{\alpha.A_{coll}} + \beta \right) + 1 - (1 - \gamma)(1 + \beta)^{\gamma} \quad (1-16)$$

$$f_{sav} = SC.(a'+b'.FSC + c'.FSC^2) \quad (1-17)$$

Dans [Letz et al., 2009], sont calculés les coefficients α , β et γ permettant d'obtenir le plus fort facteur de régression sur l'ensemble des courbes f_{sav} en fonction de FSC :

$$\begin{aligned} \alpha &= 160 \text{ L/m}^2 \\ \beta &= 0.1 \\ \gamma &= 0.25 \end{aligned} \quad (1-18)$$

Cette équation corrigée améliore l'estimation d'énergie d'appoint consommée à partir de la courbe caractéristique d'un système et peut être facilement utilisée comme outil de dimensionnement. Par contre, une faible valeur de SC a tendance à surestimer les performances des SSC. Par conséquent, il n'est pas possible d'utiliser cette extension de méthode pour la comparaison directe des performances de systèmes entre eux.

Cette méthode a fait ses preuves avec de nombreux modèles détaillés de systèmes, dans de multiples configurations. Elle n'est valable que pour les taux $f_{sav,th}$ et $f_{sav,ext}$ (voir paragraphe 1.1.3.2 ci-dessus).

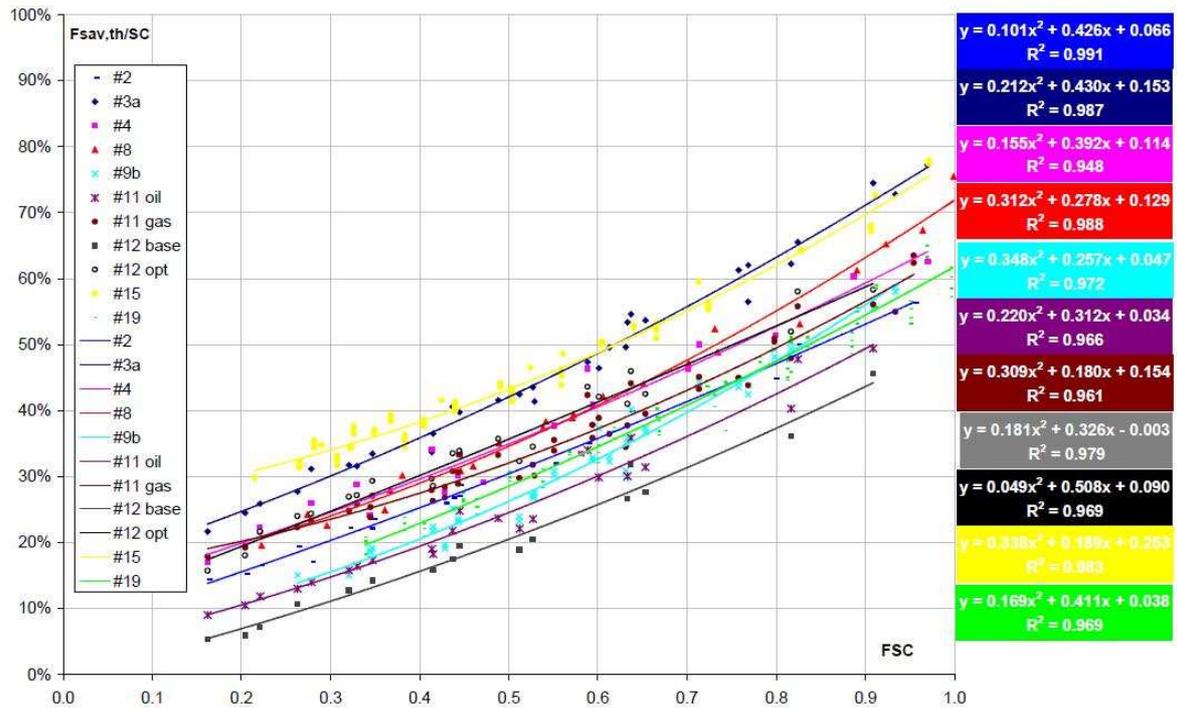


Figure 1-17 Taux d'économie d'énergie $f_{sav,th}$, avec facteur de correction selon le volume de stockage FC, en fonction de la Fonction Solarisable de Consommation FSC des systèmes simulés lors de la Tache 26 (Source : IEA SHC)

La méthode FSC est donc un outil puissant de caractérisation des SSC, mais à ce jour, ce genre de courbe ne peut être obtenu que par le biais de simulations numériques. Chaque point permettant la régression représente la performance annuelle d'une configuration figée du système, pour un environnement « climat/bâtiment » donné. Il est donc très difficile d'obtenir ces courbes caractéristiques de manière fiable grâce à un essai en laboratoire par exemple, de durée beaucoup plus courte qu'une année. Il n'existe aujourd'hui aucun lien entre des valeurs physiques concrètes du système à caractériser (issues de mesures ou d'essais) et sa courbe caractéristique.

1.2. Les méthodes actuelles d'évaluation des performances des SSC

Il est indispensable, pour assurer un développement de qualité du marché des SSC, d'avoir à disposition un moyen d'évaluer les performances énergétiques de ces systèmes. Quelques SSC ont été évalués par la procédure des Appréciation Techniques d'Expérimentation (ATEX) du CSTB¹⁰. Mais ces ATEX ne donnent pas d'éléments sur les performances des installations.

Des méthodes d'essais en laboratoire permettant d'évaluer les performances de SSC sont actuellement en cours de développement et certaines sont dédiées à des objectifs de normalisation européenne. Ces méthodes peuvent être classées en deux familles différentes, selon leur philosophie de test. Elles présentent chacune leurs avantages et inconvénients.

1.2.1. Les deux approches de tests

Pour commencer la présentation de ces deux approches de test, il est possible de souligner que leur principale différence réside en quelque sorte dans leur vision respective d'un SSC :

- La première approche considère les SSC comme un assemblage de composants : nous l'appellerons approche « composant » ;
- La deuxième approche considère les SSC comme un système unique à part entière : nous l'appellerons approche « globale ».

¹⁰ Voir <http://www.cstb.fr/evaluations/appreciation-technique-dexpermentation/presentation.html>

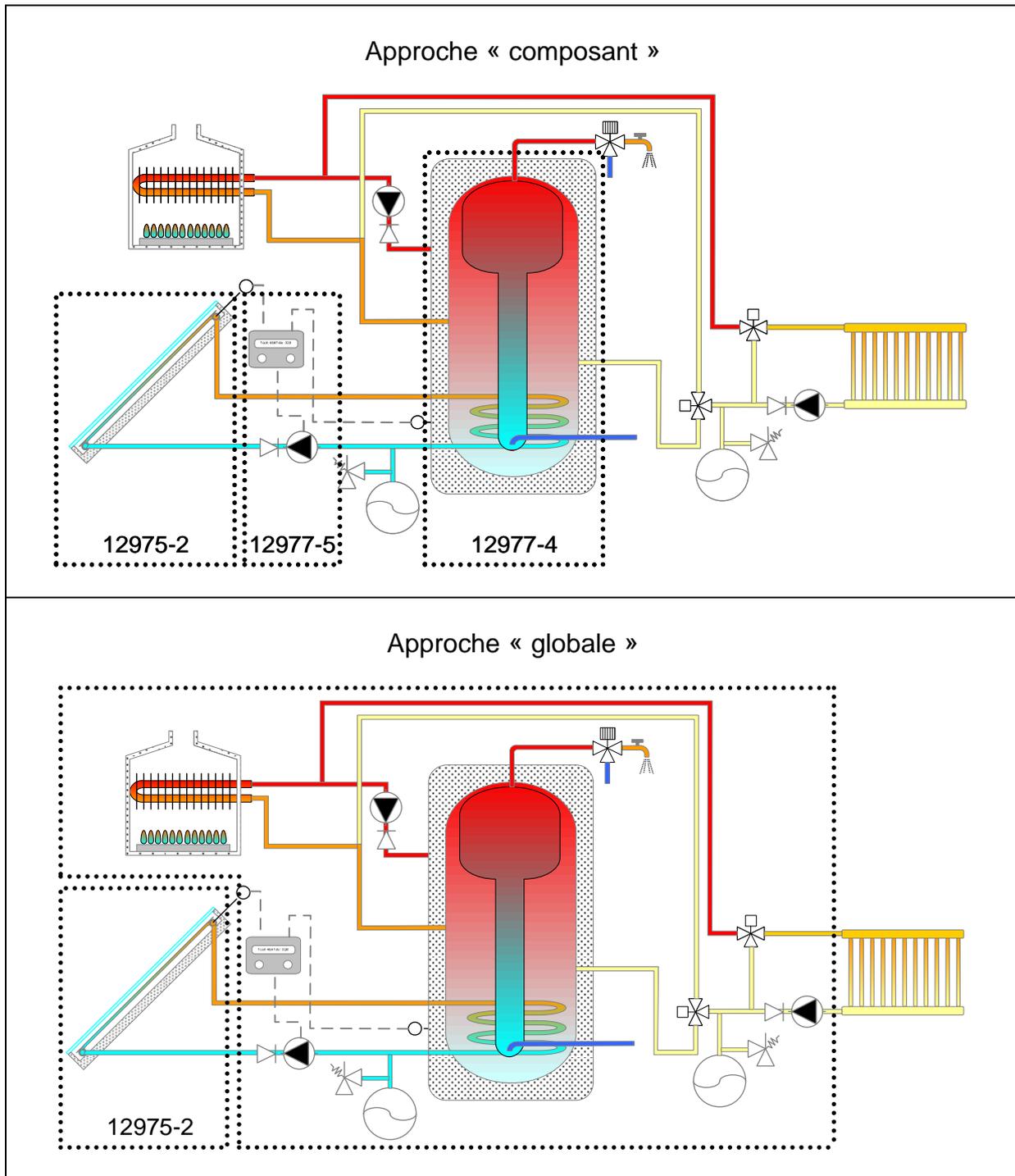


Tableau 1-4 Représentation schématique de la vision d'un même SSC selon les deux approches de tests actuelles (les nombres se rapporte aux normes européennes existantes)

Les deux approches sont décrites plus en détails dans les paragraphes suivant.

1.2.1.1. L'approche composant

Les méthodes utilisant l'approche « composant » consistent à tester individuellement les principaux composants du système. Les paramètres caractéristiques de chacun d'entre eux sont identifiés et utilisés via des simulations numériques qui, en regroupant les modèles ainsi obtenus, permettent d'évaluer les performances du système complet.

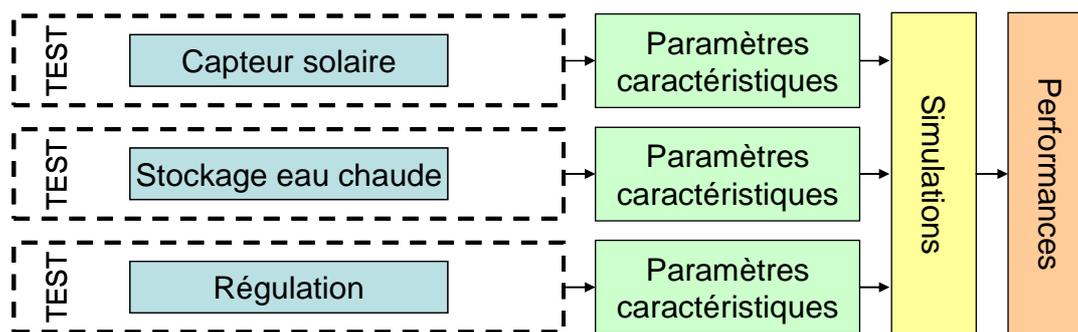


Figure 1-18 Schéma de principe des méthodes d'approche "composant"

Dans le cas des SSC, la principale méthode de cette famille est la méthode « Component Testing – System Simulation » (CTSS) [Albaric et al., 2010; Drück and Bachmann, 2002]. La méthode CTSS est utilisée pour évaluer les performances thermiques de « petites installations de chauffage solaire assemblées à façon » dans la prénorme européenne [CEN/TS12977-2, 2010] mais cet essai reste facultatif. Chaque composant du SSC est testé séparément, suivant les normes européennes en vigueur (voir Tableau 1-5). Les paramètres ainsi déterminés sont introduits dans un logiciel de simulation, tel que TRNSYS [Klein, 1994] pour déterminer les performances annuelles du système complet.

Composant	Norme
Stockage d'eau chaude	CEN/TS 12977-4
Capteur solaire	EN 12975-2
Régulation	CEN/TS 12977-5

Tableau 1-5 Normes à appliquer pour la caractérisation de chaque élément d'un SSC

La méthode CTSS présente l'avantage d'être très flexible. Il est possible de tester tous les systèmes, avec des configurations différentes. Avec un certain jeu de paramètres déterminés, les performances d'un SSC peuvent être estimées pour plusieurs sites d'implantations et plusieurs bâtiments par le biais de multiples simulations. Il est également possible d'interchanger « virtuellement » différents composants entre eux, à condition que leurs paramètres spécifiques soient à disposition. L'influence de certaines combinaisons d'éléments sur les performances du SSC est ainsi évaluée.

Par contre, l'ensemble des tests nécessaires à l'identification des paramètres de chaque élément est long, et peut être très coûteux. De plus, les interactions entre les composants et leurs régulations sont seulement simulées. Or, il a été souvent remarqué que les principaux problèmes des SSC sont liés à des difficultés d'installation et à l'incohérence des comportements des éléments entre eux. Les SSC réels peuvent ainsi avoir des comportements très différents de celui attendu. Des problèmes de conception et d'installation peuvent être ignorés par ces tests.

Enfin, le test des régulateurs est très simplifié et principalement concentré sur le contrôle de la boucle solaire. Or les aspects « contrôle/commande » sont de plus en plus prépondérants dans les performances des systèmes.

1.2.1.2. *L'approche globale*

Les méthodes utilisant l'approche « globale » ont une philosophie orientée « système ». Grâce à des tests de type « boîte noire », une caractérisation globale intégrant l'ensemble du procédé est recherchée grâce à une émulation des entrées et sorties du système : capteurs solaires, circuit de distribution de chauffage et d'ECS et éventuellement chaudière d'appoint.

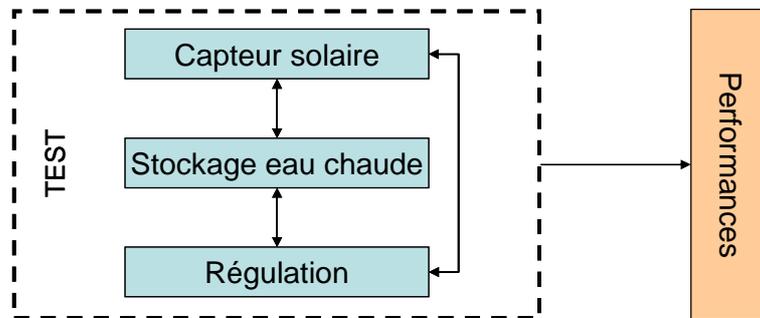


Figure 1-19 Schéma de principe des méthodes d'approche "globale"

De telles méthodes existent déjà pour les CESI : la méthode « Collector and System Testing Group » (CSTG), présente dans la norme ISO 9459-2 [ISO9459-2, 1995], et la « Dynamic System Test » (DST), présente dans la norme ISO 9459-5 [ISO9459-5, 2007]. La première est réservée au simple préchauffage solaire sans système d'appoint tandis que la deuxième peut prendre en compte les CESI avec appoints. Ces méthodes permettent d'identifier des paramètres décrivant simplement le comportement des systèmes et caractérisant leurs performances.

Dans le cadre des SSC plusieurs méthodes du même type ont été mises au point. Pour chacune d'entre elles, la procédure commence par l'installation du système complet (à l'exception des capteurs) sur un banc de test et procède ensuite à une phase de pré-conditionnement. La charge et la décharge thermique du système est faite selon une séquence de test propre à chaque méthode. Par exemple, la méthode « Annual Calculation/Direct Comparison » (AC/DC), décrite dans [Bales, 2002], prévoit une phase centrale de test de 6 jours, représentant 2 jours d'hiver, 2 jours d'été et 2 jours de saison intermédiaire. La méthode « Concise Cycle Test » (CCT), décrite dans [Vogelsanger, 2002], a une phase centrale de test de 12 jours-chaque jour représentant les évolutions climatiques moyennes de chaque mois de l'année. Les performances annuelles sont évaluées à l'aide d'une simple extrapolation de l'énergie d'appoint consommée durant la procédure.

Avec ce type d'approche, on est assuré que l'ensemble des fonctions et interactions ayant lieu au sein du système est pris en compte. De plus, le temps nécessaire à l'application de ces tests est relativement court, le plus long durant une douzaine de jours.

Par contre, les résultats obtenus avec cette approche sont figés aux conditions utilisées pendant les tests. Les performances annuelles d'un système sont évaluées pour un système donné (type de régulateur, de ballon de stockage,...) et des conditions aux limites fixées (surface de capteur, type de bâtiment, conditions climatiques, puisage ECS, ...). Il est donc délicat, à partir de ces méthodes, de dimensionner un SSC en phase amont, et d'évaluer ses performances (voir

paragraphe 1.1.3.3 ci-dessus) dans des conditions autres que les conditions d'essais, sauf à faire de nouveaux essais avec des conditions aux limites différentes

1.2.1.3. Synthèse et sélection de la méthode

Les avantages et inconvénients des deux approches de test de performances des SSC sont synthétisés dans le Tableau 1-6.

Approche « Composant »		Approche « Globale »	
+	-	+	-
<ul style="list-style-type: none"> - Principe simple - Résultats flexibles (possibilité de changer de conditions aux limites) - Etude de dimensionnement de système possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Longue période de tests de chaque composant - Interactions entre composants sont simulées (aspects conception et installation pas pris en compte) 	<ul style="list-style-type: none"> - Intègre l'ensemble du système (aspects conception et installation pris en compte) 	<ul style="list-style-type: none"> - Résultats limités (configuration du système et conditions aux limites figées aux conditions de test)

Tableau 1-6 Synthèse des avantages et inconvénients des deux approches existantes de test de performances des SSC

Les performances des SSC étant vraiment très sensibles à leur conception et à leur installation, nous considérons qu'il est très important de considérer les vraies interactions entre les éléments d'un système pour pouvoir évaluer ses performances de manière vraiment fiable : l'approche globale sera donc adoptée dans notre étude. Elle sera basée plus particulièrement sur la méthode « Short Cycle System Performance Test » (SCSPT), développée par le CEA à l'INES [Albaric et al., 2008]. Afin d'étendre les possibilités d'utilisation de cette méthode, notamment à d'autres conditions aux limites, nous compléterons la méthodologie actuelle, décrite ci-dessus, par une étape d'identification de modèles évolués du système à tester. Le principe de cette amélioration est représenté dans le Tableau 1-7.

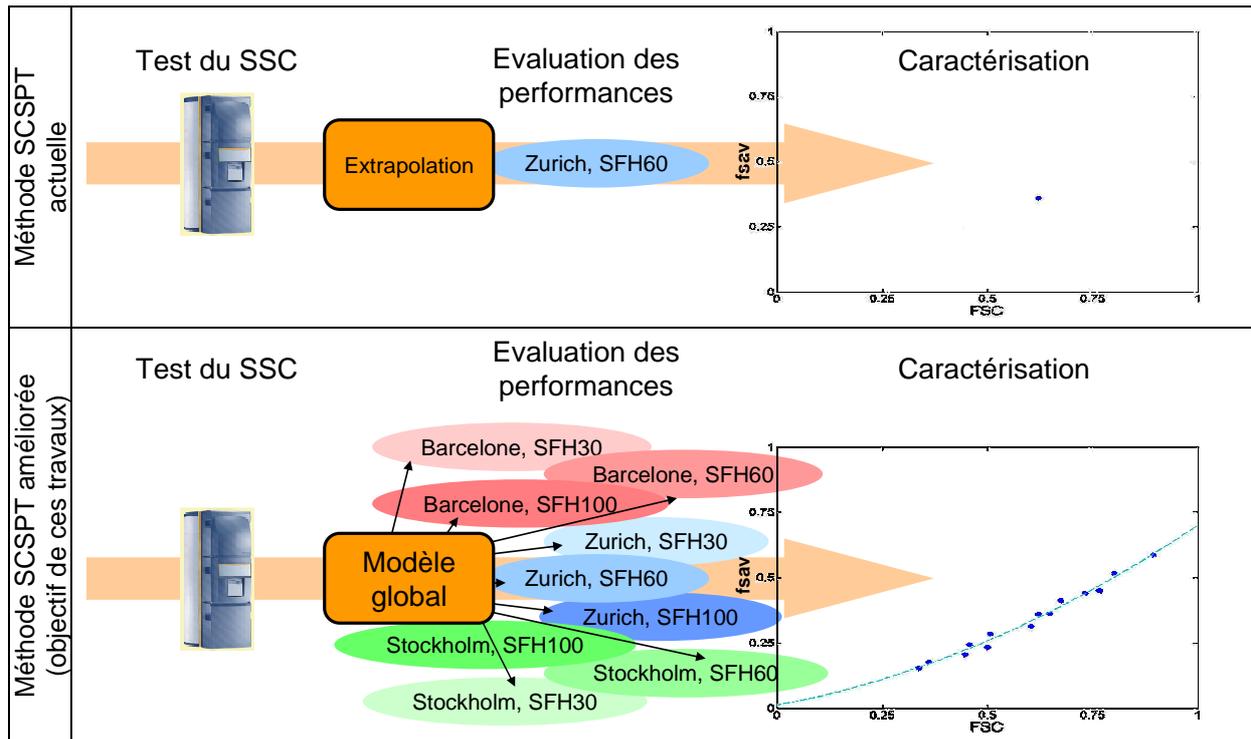


Tableau 1-7 Schémas représentant les résultats disponibles avec la méthode SCSPT actuelle et avec son amélioration envisagée

1.2.2. Description de la méthode SCSPT

La méthode SCSPT est décrite dans [Albaric et al., 2008] et [Albaric et al., 2010]. Son protocole s'inspire fortement de la méthode CCT. En tant que méthode d'approche « globale » (voir paragraphe 1.2.1.2 ci-dessus), la première étape consiste à installer le SSC à tester sur le banc d'essai semi-virtuel. Ensuite, un protocole incluant une phase de pré-conditionnement du système, puis une séquence de test de 12 jours, est lancé. Finalement, les flux énergétiques enregistrés durant la phase de test sont extrapolés pour évaluer les performances annuelles.

La différence entre CCT et SCSPT réside dans la composition de la séquence de test. La première méthode choisit simplement 12 jours représentant l'évolution annuelle de variables météorologiques, chaque journée étant représentative d'un mois. Le problème est que sur cette courte séquence, l'inertie du système a tendance à surestimer les performances : lors des journées d'automne, le système chargé pendant les journées d'été consomme moins d'énergie que ce qu'il devrait. La méthode SCSPT tente de surmonter ce problème en incluant un critère d'inertie dans la sélection des journées pour composer les 12 jours de séquence de test.

Cette dernière méthode a montré de bons résultats d'évaluation de performance dans le cadre de plusieurs projets, aussi bien français (comme le projet *EvaluationSSC* [Albaric et al., 2009]), qu'europeens (comme le projet *Combisol* [Mette et al., 2010]). Plusieurs acteurs du domaine des SSC ont ainsi manifesté leur intérêt envers cette méthode lors de programmes collaboratifs de R&D menés en partenariats avec des industriels.

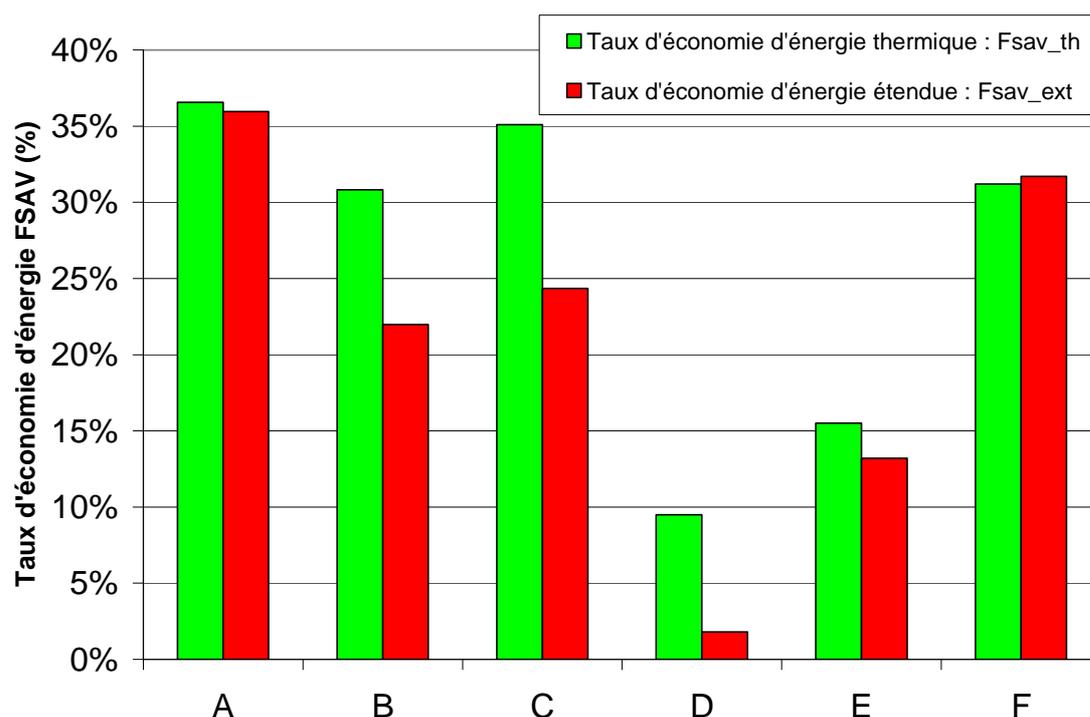


Figure 1-20 Exemple de résultats obtenus par la méthode SCSPT pour 6 SSC différents

1.2.2.1. Le banc d'essai semi-virtuel

Le banc d'essai semi-virtuel situé dans les locaux de l'INES permet de tester n'importe quel système thermique en le confrontant à un environnement virtuel.

Dans les cas des SSC, chaque composant propre au fonctionnement du système à tester est physiquement présent dans la cellule de test : stockage(s), régulation(s), circulateur(s), circuit(s) sont installés sur le banc d'essai comme s'ils étaient installés normalement dans un bâtiment. Si le fonctionnement de base du SSC étudié inclut un système d'appoint particulier, celui est également installé sur le banc d'essai. Les variables météorologiques, les capteurs, le puisage ECS, les émetteurs de chaleur et le bâtiment sont, quant à eux simulés sous TRNSYS.

La communication entre le système réel et l'environnement virtuel se fait grâce aux modules hydrauliques. Ces modules sont connectés à un réseau d'eau surchauffée (180°C) et un réseau d'eau glacée (-12°C), alimentés par une installation dédiée, communément appelée « chaufferie centrale ». Ainsi, par le biais d'échangeurs, chaque module peut réchauffer ou refroidir le fluide d'un circuit secondaire, rapidement et sur commande via un ordinateur de supervision.

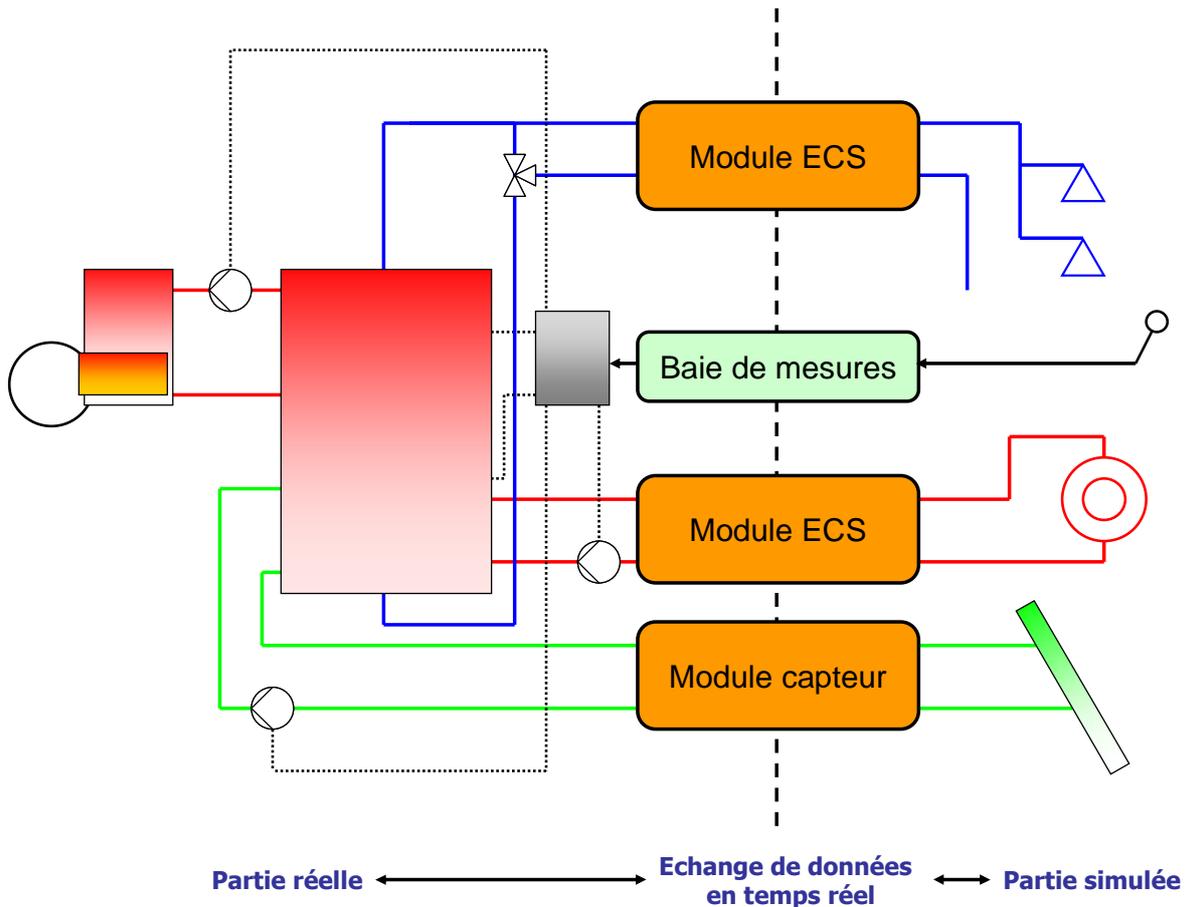


Figure 1-21 Schéma représentant le principe de séparation entre le SSC réel et un environnement virtuel, communiquant par le biais de modules émulateurs

Le principe du banc d'essai semi-virtuel est le suivant : chaque circuit du SSC (principalement les circuits d'ECS, de chauffage et des capteurs) est connecté à un module. A chaque pas de temps (1 minute), les modules enregistrent la température et le débit du fluide entrant et envoient ces données à l'ordinateur de supervision. Celles-ci sont utilisées en tant qu'entrées de la simulation en cours sous TRNSYS (Figure 1-22).

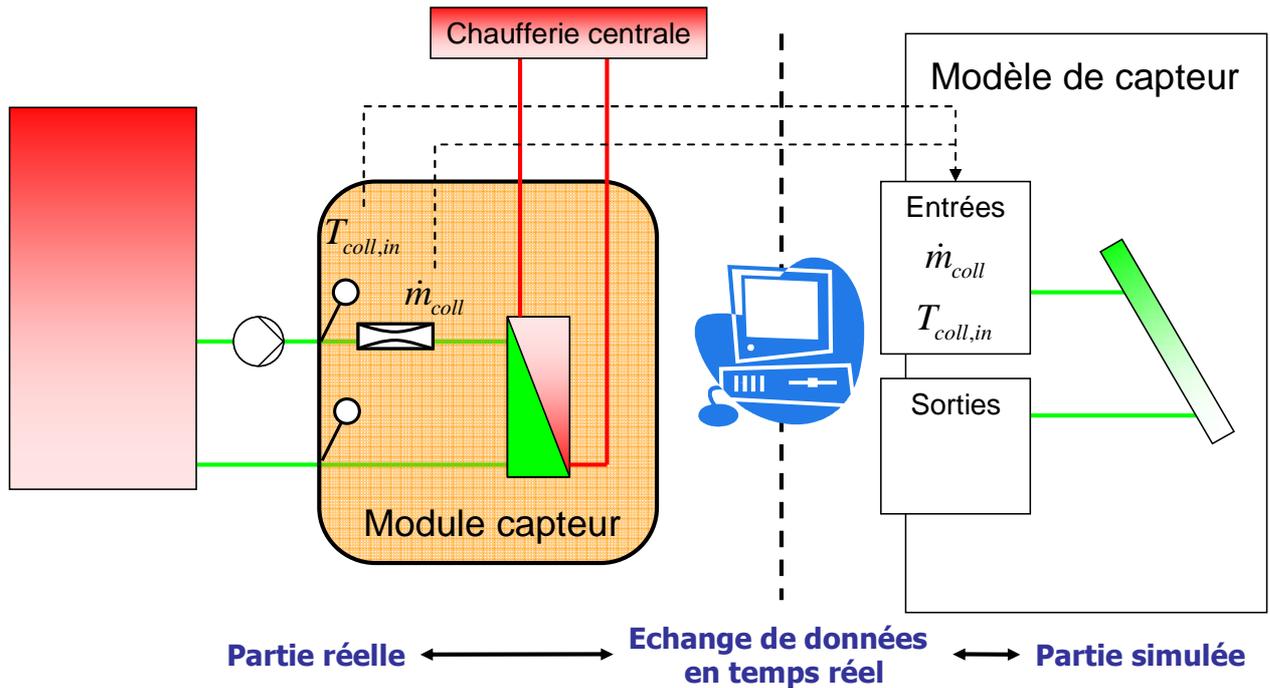


Figure 1-22 Illustration de la première étape d'échange d'information pendant le test semi-virtuel avec l'exemple du module capteur

Selon les calculs des modèles numériques utilisés, les températures et débits de retour résultants sont envoyés comme consignes vers les modules hydrauliques, qui augmentent ou réduisent ainsi la température du fluide du système à l'aide de réseaux d'eau surchauffée et d'eau glacée selon les besoins (voir la description de la « chaufferie centrale » ci-dessous).

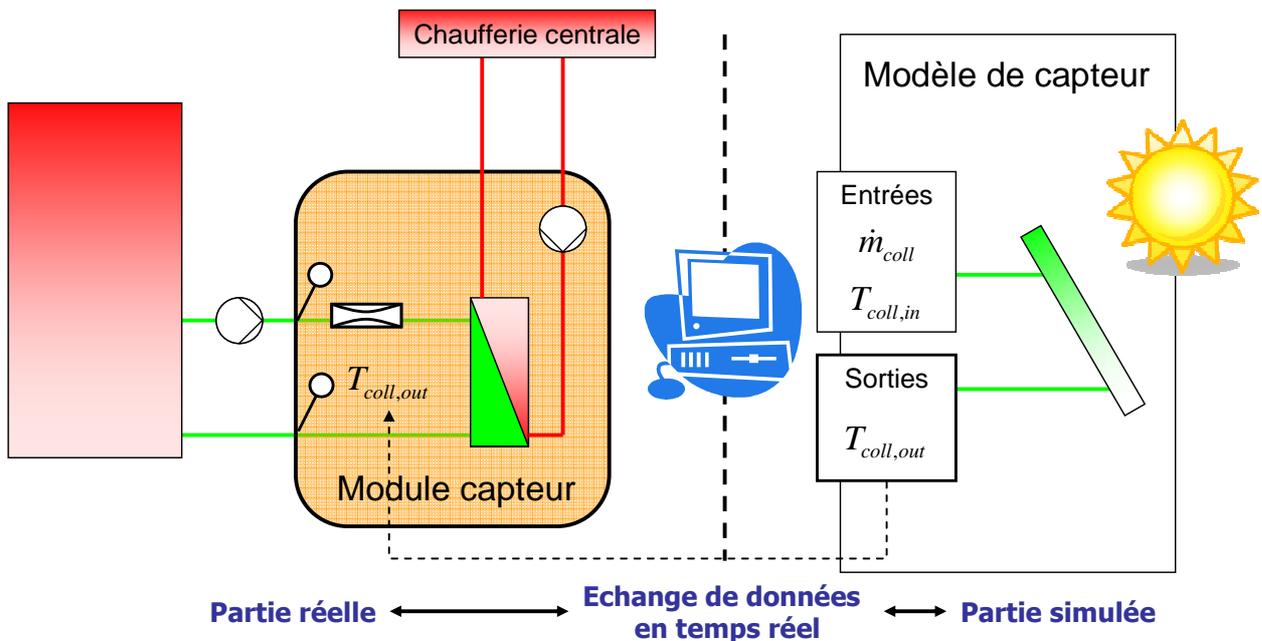


Figure 1-23 Illustration de la deuxième étape d'échange d'information pendant le test semi-virtuel avec l'exemple du module capteur

De cette manière, chaque module émule les éléments virtuels modélisés par le logiciel. Certaines sondes utilisées par la régulation du système doivent normalement être installées dans des éléments ici simulés (par exemple pour mesurer les températures d'air intérieur et extérieur). Dans ce cas, ces sondes sont également émulées grâce à des boîtes de résistance. Les données échangées sont représentées sur la Figure 1-24.

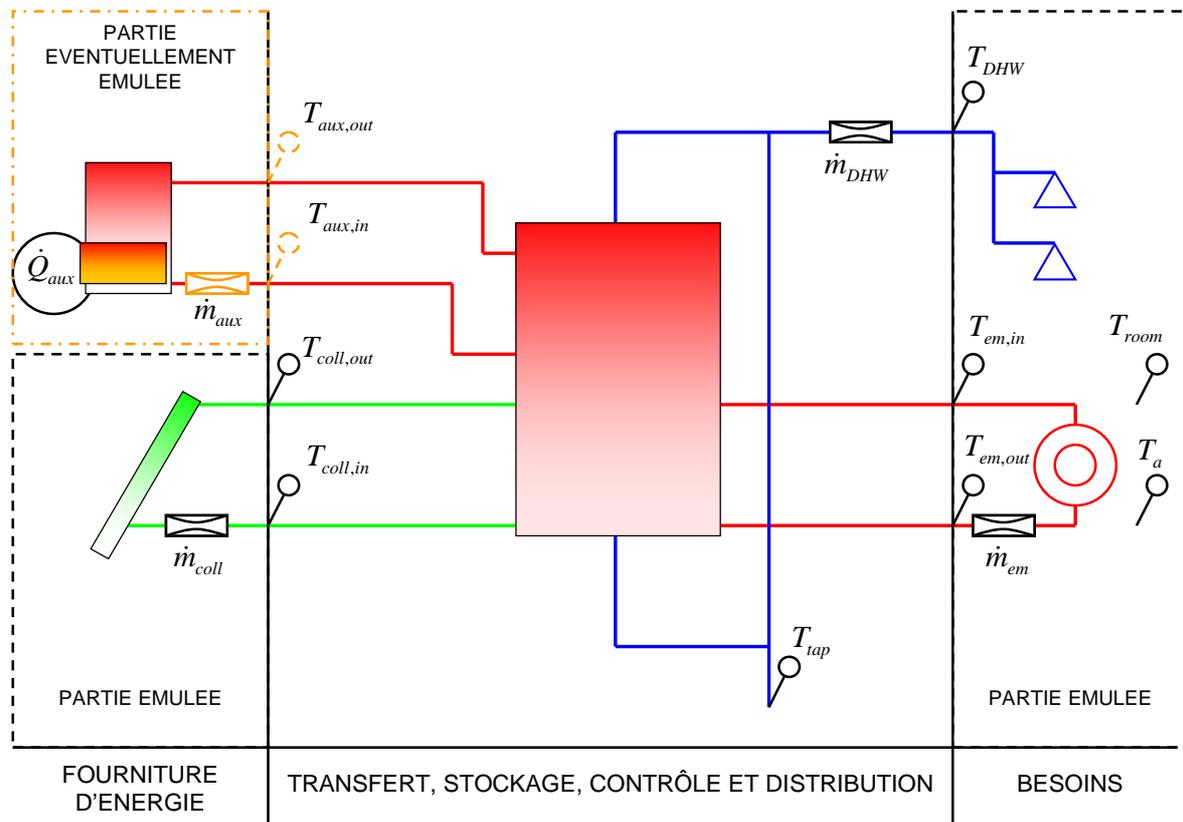


Figure 1-24 Schéma représentant les données échangées entre le système et l'environnement virtuel pendant le test

Les caractéristiques techniques du banc d'essai sont présentées dans la partie expérimentale de nos travaux de recherche (voir paragraphe 4.1.1).

Une fois installé, le système à tester peut se comporter comme s'il était réellement installé dans un bâtiment, influencé par des variations climatiques. Le point essentiel pour que la méthode fonctionne est de déterminer quel environnement virtuel va permettre d'évaluer les performances du système en une douzaine de jours.

1.2.2.2. L'environnement virtuel de la méthode SCSPT

La méthode SCSPT utilise un environnement virtuel précis pour évaluer les performances des SSC à partir d'une séquence de 12 jours de test sur le banc semi-virtuel [Nowag, 2007]. L'objectif est de rendre proportionnelle la consommation d'énergie du système testé pendant la séquence « 12 jours » ($Q_{aux,12d}$) avec celle correspondant à l'année entière pour couvrir les mêmes besoins et pour le même climat (Q_{aux}). De cette manière, l'énergie annuelle consommée est évaluée par la

simple extrapolation exprimée dans l'équation (1-19) (\hat{Q}_{aux} signifie évaluation de Q_{aux}).

$$\hat{Q}_{aux} = \frac{365}{12} Q_{aux,12d} \quad (1-19)$$

L'environnement virtuel est composé des modèles suivants :

- Les besoins en chauffage

Le modèle de bâtiment utilisé est celui défini lors de la Tâche 32 du programme SHC de l'IEA [Heimrath et Haller, 2007]. Une architecture commune est définie et des variantes en termes d'isolation sont proposées pour obtenir au final trois bâtiments de qualités énergétiques différentes : SFH30, SFH60 et SFH100. Ces bâtiments, accueillant une seule famille (Single Family House), ont des besoins de chauffage respectivement de 30, 60 et 100 kWh/m² par an pour le climat de Zurich. Ces modèles sont expliqués plus en détails dans le CHAPITRE 2 et l'ANNEXE A.

Le modèle de bâtiment choisi est couplé à un modèle de radiateur à eau chaude utilisant un paramétrage standard (voir paragraphe 2.2.2.3).

- Les besoins en ECS

Un profil de puisage annuel a été défini à l'aide de méthodes statistiques pour prendre en compte des conditions quasi-réalistes. Les fichiers correspondants sont générés par le programme mis au point par [Jordan et Vajen, 2001]. Certains profils sont distribués librement par le Solar Energy Laboratory de l'Université du Wisconsin à Madison¹¹.

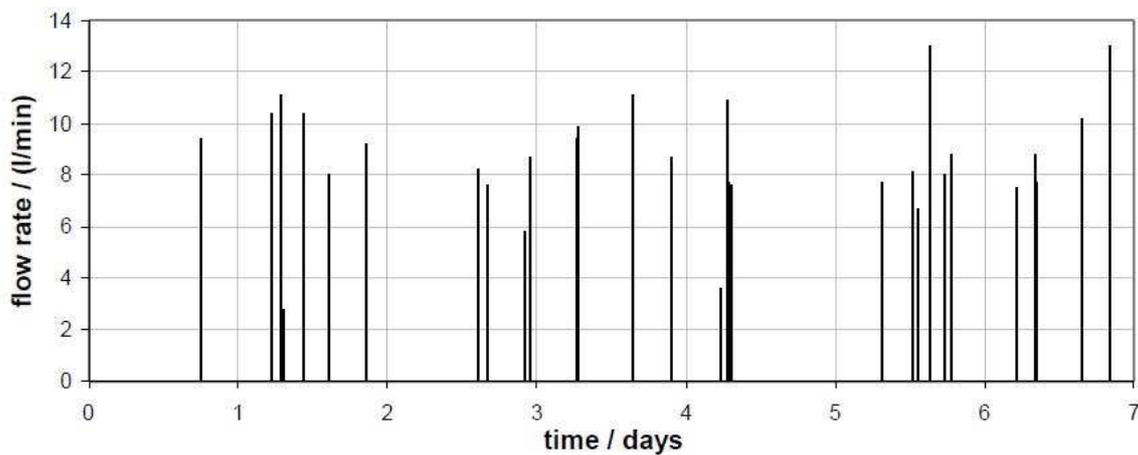


Figure 1-25 Exemple de profil de soutirage obtenu sur une semaine avec un pas de temps de 6 minutes (Source : Jordan)

La température de consigne pour l'ECS est fixée à 45°C. La température d'eau froide est exprimée par l'équation (1-20). Elle suit un profil sinusoïdal sur toute la durée de la séquence ($N_{day,seq}$, nombre de jours de la séquence qui est ici 12). Sa variable est

¹¹ <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/library15.htm#IEA26Load>

CHAPITRE 1

le temps $time$, exprimé en heure. Sa variation (température moyenne $T_{tap,av}$, amplitude ΔT_{tap} et déphasage d_{off}) dépend du lieu de la simulation.

$$T_{tap} = T_{tap,av} + \Delta T_{tap} \sin\left(360 \cdot \frac{time + (273.75 - d_{off}) \cdot 24}{N_{day,seq} \cdot 24}\right) \quad (1-20)$$

- Le capteur

Le modèle de capteur utilisé est celui défini par [Perers et Bales, 2002]. Ce modèle sera décrit plus en détail dans le Chapitre 2 (paragraphe 2.2.2.2). Il permet notamment de modéliser les capteurs plans et les capteurs à tubes sous vides, et utilisent des paramètres caractéristiques identifiés à partir d'essais normatifs.

- Le climat

Le climat est modélisé par une séquence de 12 jours de données météorologiques (position du soleil, ensoleillement, température de l'air extérieur, température sèche et humidité). La séquence est représentative d'un climat au choix et est générée par un algorithme présenté dans [Albaric et al., 2008]. Cet algorithme, qui est la particularité de la méthode SCSPT, se base sur des simulations du SSC de référence, modélisé lors de la Tâche 32 [Heimrath and Haller, 2007], dans les conditions présentées dans le Tableau 1-8.

Bâtiment	SFH60
Puisage ECS	200L/jour Pas de temps de 6 minutes
Surface capteur	12m ²
Volume de stockage	600L

Tableau 1-8 Conditions de la simulation du système de référence pour la génération de la séquence de test d'un climat

L'algorithme sélectionne 12 jours d'une séquence climatique annuelle (choisie par l'utilisateur) de manière à ce que 2 critères particuliers, la variation d'énergie stockée dans le ballon et les besoins de chauffage, aient une évolution équivalente, jour après jour pendant la séquence de test et mois après mois pendant la séquence annuelle.

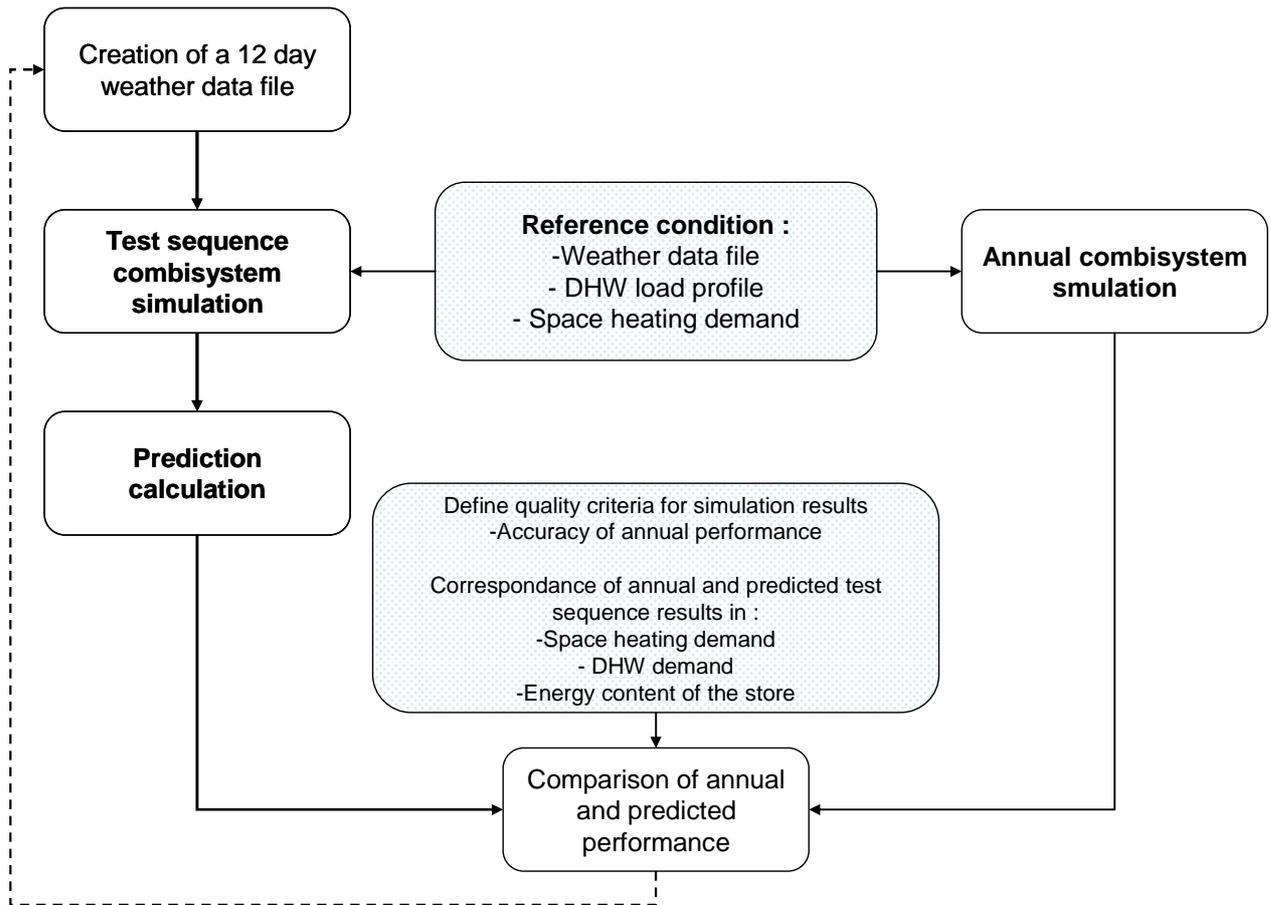


Figure 1-26 Représentation du processus itératif de sélection des 12 jours de la séquence de test d'un climat (Source : Albaric)

Par exemple, les jours sélectionnés par l'algorithme à partir de la séquence annuelle Meteonorm¹² de Zurich (CH-Zuerich-SMA-66600.tm2) et Stockholm (SE-Stockholm-Arlanda-24600.tm2) sont présentés dans le Tableau 1-9.

Climat	N°jour séquence de test	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zurich	N°jour séquence annuelle	20	57	298	116	198	228	244	259	134	57	26	328
Stockholm		64	70	84	137	163	140	140	126	121	113	51	28

Tableau 1-9 Jours sélectionnés pour constituer les séquences de test correspondant aux climats de Zurich et Stockholm

Les évolutions résultantes des critères sur le SSC de référence sont comparées dans la Figure 1-27.

¹² www.meteonorm.com

CHAPITRE 1

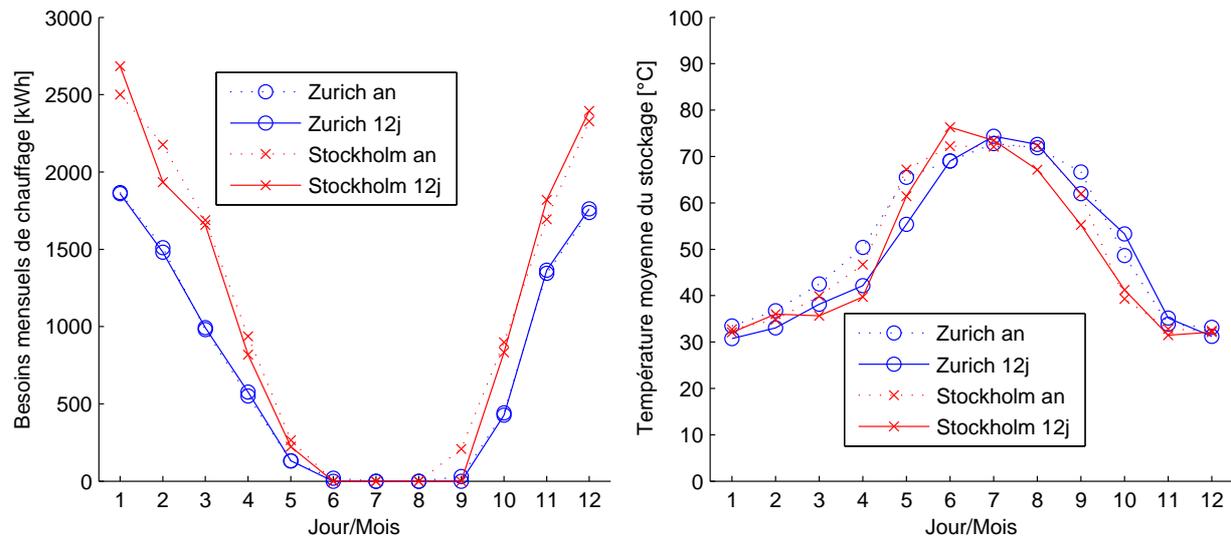


Figure 1-27 Comparaison des besoins de chauffage (à gauche) et de variation de l'énergie stockée (à droite) entre la séquence "12jours" et la séquence annuelle

Une fois générée pour un climat, cette même séquence météorologique est utilisée pour tous les systèmes testés. La performance du SSC ainsi évaluée est valable pour le climat et le type de bâtiment choisis dans cet environnement virtuel.

1.2.2.3. La séquence complète

La séquence complète de test consiste en une phase de conditionnement (32 heures), une phase centrale de test avec l'environnement décrit ci-dessus (12 jours) et d'une phase de décharge du stockage (8 heures).

N°	Phase	Durée (heures)	Description
1	Conditionnement initial	0	Conditionnement du ballon à 20°C (sans énergie solaire ni appoint)
2	Premier conditionnement	8	Parties basses et hautes du ballon amenées à température raisonnable. Partie haute chauffée par l'appoint selon sa consigne.
3	Deuxième conditionnement	24	Simulation de la dernière journée de la séquence pour amener le ballon dans un état semblable en début et fin de la phase centrale de test
4	Phase centrale de test	288	Application de la séquence 12 jours de test
5	Décharge finale	8	Décharge du ballon

Tableau 1-10 Description des phases de la séquence de test complète

1.2.2.4. Validation et résultats de la SCSPT

La méthode SCSPT a été testée dans le cadre du projet européen Combisol, qui a pour objectif d'aider le développement du marché des SSC en faisant la promotion des systèmes standardisés permettant une meilleure qualité des systèmes installés. La méthode a été plus particulièrement étudiée dans [Mette et al., 2010].

- Validation numérique

Tout d'abord, la pertinence de la sélection des journées de test pour les climats de Zurich et Stockholm a été montrée numériquement. Trois modèles de SSC sous TRNSYS ont été simulés avec les environnements de tests présentés ci-dessus et les séquences « 12 jours » correspondant à chacun des climats. Ces simulations ont été réalisées plusieurs fois avec trois types de bâtiments et trois surfaces de capteurs différentes. L'extrapolation de l'énergie consommée sur ces séquences 12 jours sont à chaque fois très proches des résultats des simulations annuelles correspondantes. Les différences dépassent rarement les 10% pour chaque simulation.

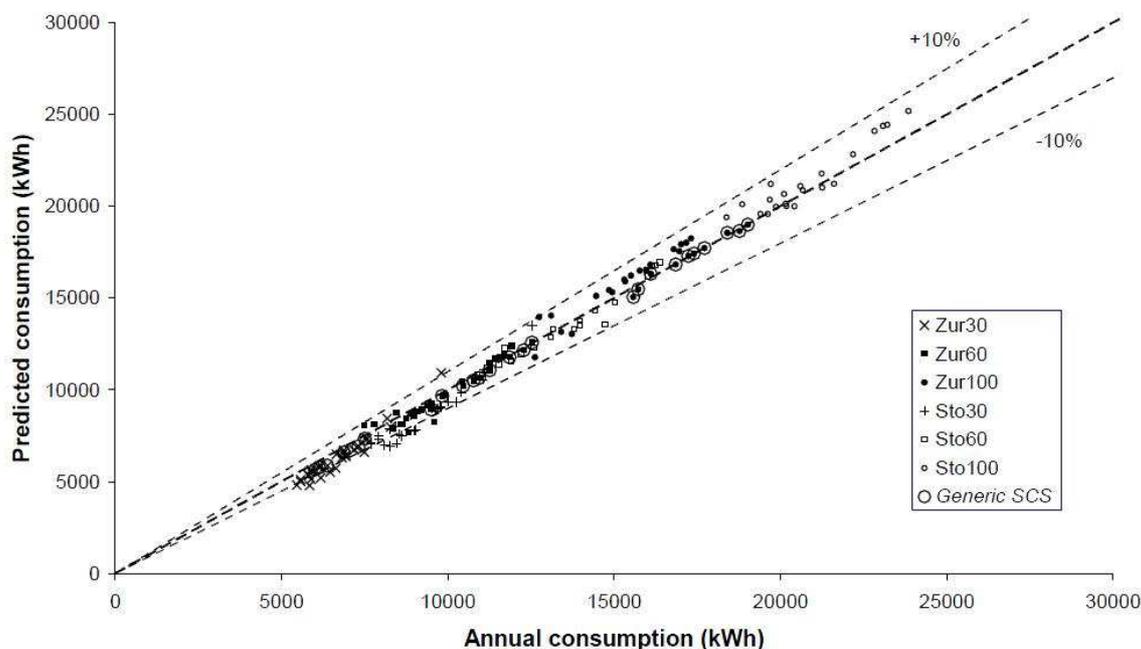


Figure 1-28 Comparaison de l'énergie consommée par l'appoint, entre celle obtenue par simulations annuelles et celle prédite à partir des simulations « 12 jours », pour 3 modèles de SSC différents (seul le générique est différencié), 3 types de bâtiments et 2 climats (Source : Albaric)

- Comparaison avec la méthode CTSS

La méthode SCSPT et la méthode CTSS, brièvement décrite dans la section 1.2.1, ont été comparées en testant deux systèmes avec les deux méthodes. Les résultats bruts sont différents, et ceci pour deux principales raisons:

- La procédure CTSS considère que les demandes en ECS et en chauffage sont satisfaites alors que la procédure SCSPT laisse le système gérer les températures d'ECS et la température intérieure par lui même. Par conséquent, si par exemple la température intérieure est au-dessus ou en-dessous de sa consigne à cause d'une régulation imparfaite ou défaillante, la chaleur fournie pour le chauffage peut être très différente des besoins.
- Aucune perte de chaleur des circuits hydrauliques n'est considérée dans le cadre de la méthode CTSS alors celles-ci sont réellement présentes dans le cadre des tests SCSPT.

Système	Méthode de test	Energie fournie pour le chauffage [kWh]	Energie fournie pour l'ECS [kWh]
SSC1	SCSPT	9000	3103
	CTSS	8540	3000
SSC2	SCSPT	13298	3002
	CTSS	8540	3000

Tableau 1-11 Comparaison des énergies fournies pour le chauffage et l'ECS selon les deux méthodes de tests sur deux SSC

Cependant, si les simulations finales de la méthode CTSS sont adaptées pour correspondre aux résultats des essais 12 jours de la méthode SCSPT (c'est à dire en ajoutant des déperditions sur les circuits par exemple), il y a une bonne concordance entre les évaluations de performances annuelles de chaque méthode. Les figures ci-dessous (Figure 1-29 et Figure 1-30) illustrent ces résultats en comparant l'énergie solaire arrivant sur la surface des capteurs (E_{col}), les besoins de chauffages (Q_{SH}) et d'ECS (Q_{ECS}), la consommation de l'appoint (Q_{aux}), l'énergie récupérée par les capteurs (Q_{solar}), les pertes thermiques du système (Q_{loss}) et la consommation de référence (Q_{ref}), obtenus par les deux méthodes appliquées aux deux SSC de test.

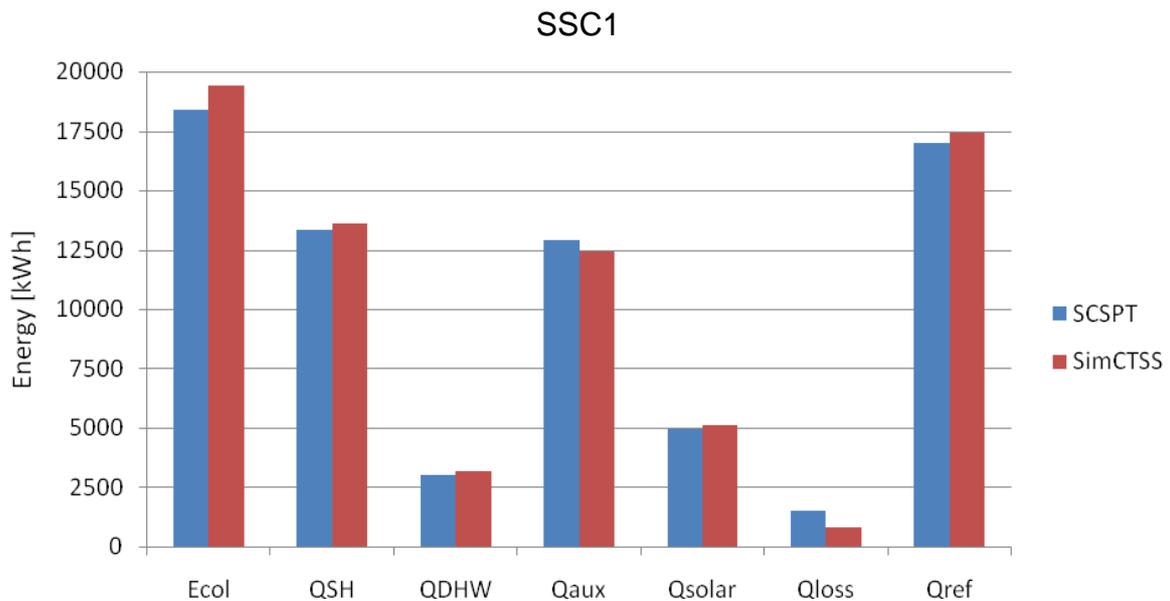


Figure 1-29 Comparaison des flux énergétiques du SSC1 enregistrés pendant les tests SCSPT aux résultats de la simulation CTSS adaptée (Source : Combisol)

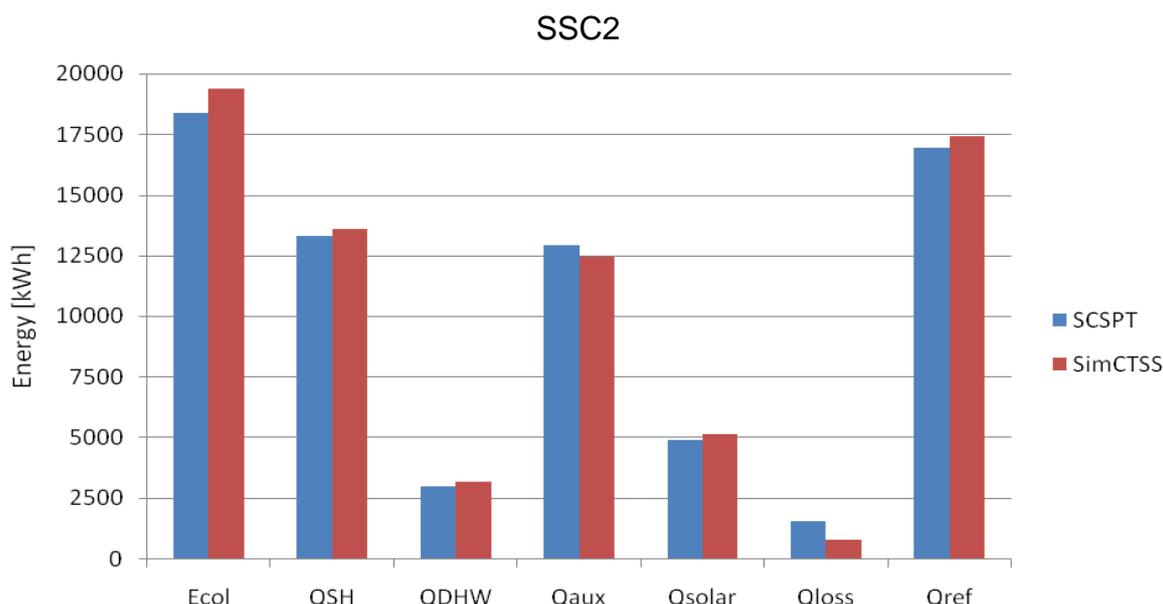


Figure 1-30 Comparaison des flux énergétiques du SSC2 enregistrés pendant les tests SCSPT aux résultats de la simulation CTSS adaptée (Source : Combisol)

- Extrapolation des évaluations à d'autres conditions

Pour évaluer les performances de SSC dans différentes conditions de climat et de besoins en ECS, à partir d'un test SCSPT, une combinaison de cette méthode avec le « COMBI-EN tool », développé par [Nielsen, 2010], a été tentée dans le cadre du projet COMBISOL. L'outil « COMBI-EN tool » est basée sur les calculs de la norme EN 15316-4-3 [EN15316-4-3, 2007], qui est elle même fortement inspirée de la méthode f-Chart [Duffie et Beckman, 2006]. Les paramètres des systèmes sont d'abord ajustés dans le « COMBI-EN tool » pour avoir des résultats proches des données expérimentales de la SCSPT lorsque la séquence « 12 jours » correspondante est évaluée grâce à cet outil. Ensuite, ce dernier est utilisé pour évaluer les performances annuelles du SSC testé pour d'autres climats et besoins en ECS. Les estimations sont similaires à celles de la méthode CTSS mais seulement pour des climats proches des conditions de test de la SCSPT. Les écarts entre les évaluations des deux méthodes s'amplifient lorsque l'irradiation solaire augmente sur le plan des capteurs par exemple (voir Figure 1-31 et Figure 1-32).

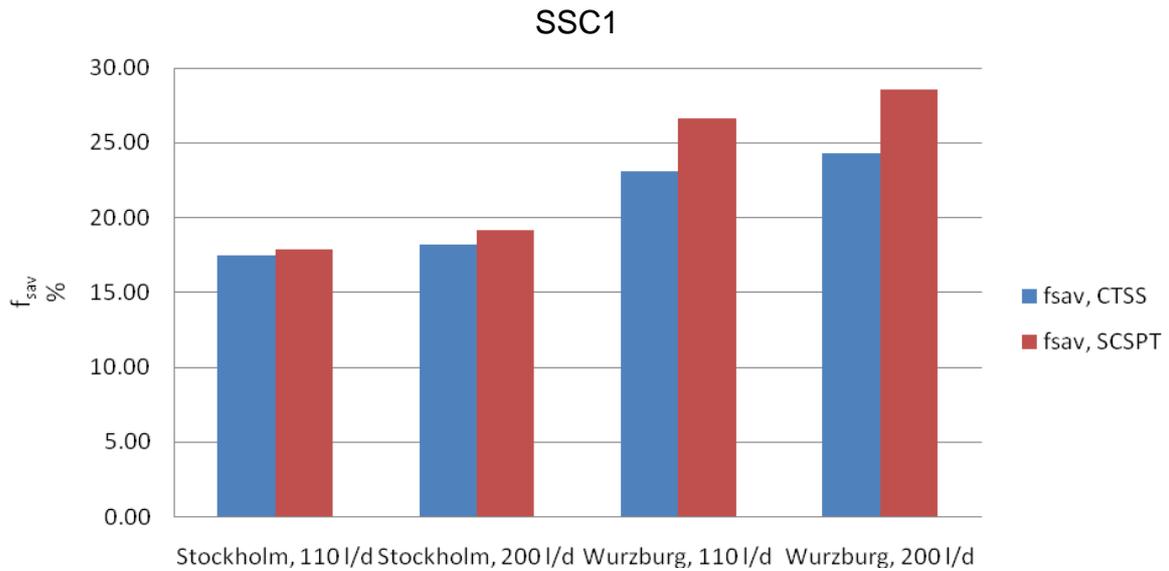


Figure 1-31 Comparaison des performances évaluées pour différents climats et besoins en ECS, selon les deux méthodes pour le SSC1 (Source : Combisol)

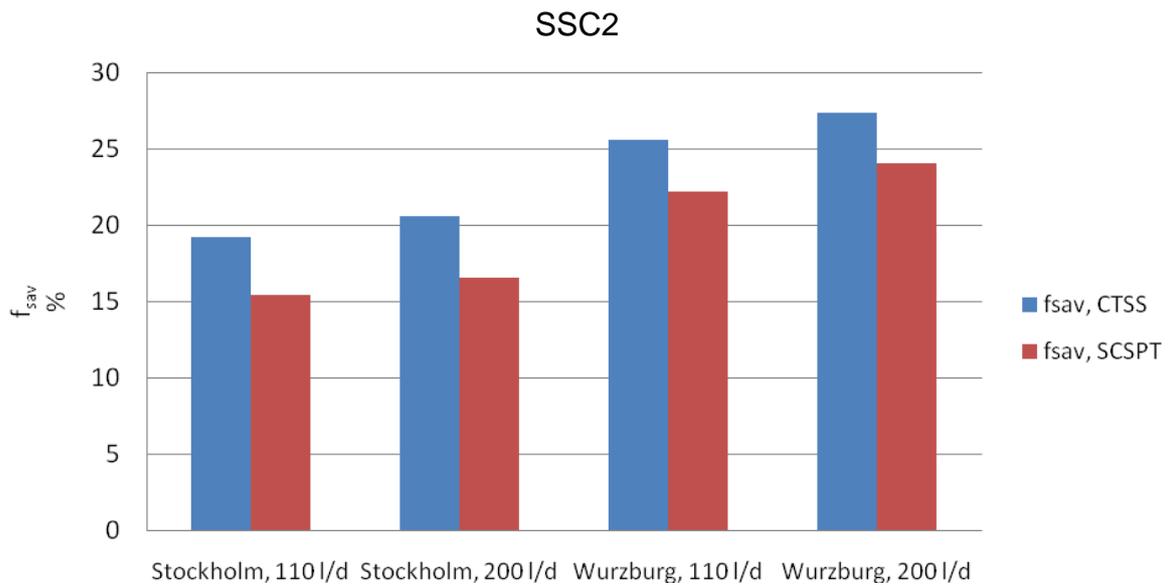


Figure 1-32 Comparaison des performances évaluées pour différents climats et besoins en ECS, selon les deux méthodes pour le SSC2 (Source : Combisol)

- Comparaison avec des résultats de suivi in situ

Le projet Combisol incluait une partie de suivi d'installation in-situ [Letz et al., 2010]. Trois SSC testés avec la méthode SCSPT ont également été suivis dans cette partie du projet. Les climats des lieux de chacune de ces installations sont similaires aux conditions climatiques utilisées lors des tests. Les charges thermiques sont assez similaires pour deux d'entre elles (appelées *Manufacturer 1* et *Manufacturer 3* sur la Figure 1-33). L'autre (*Manufacturer 2*) a des charges moins importantes que celles de l'environnement virtuel de test. Globalement, les performances évaluées par la

méthode SCSPT sont cohérentes avec celles mesurées lors des suivis in-situ, pour les trois SSC testés.

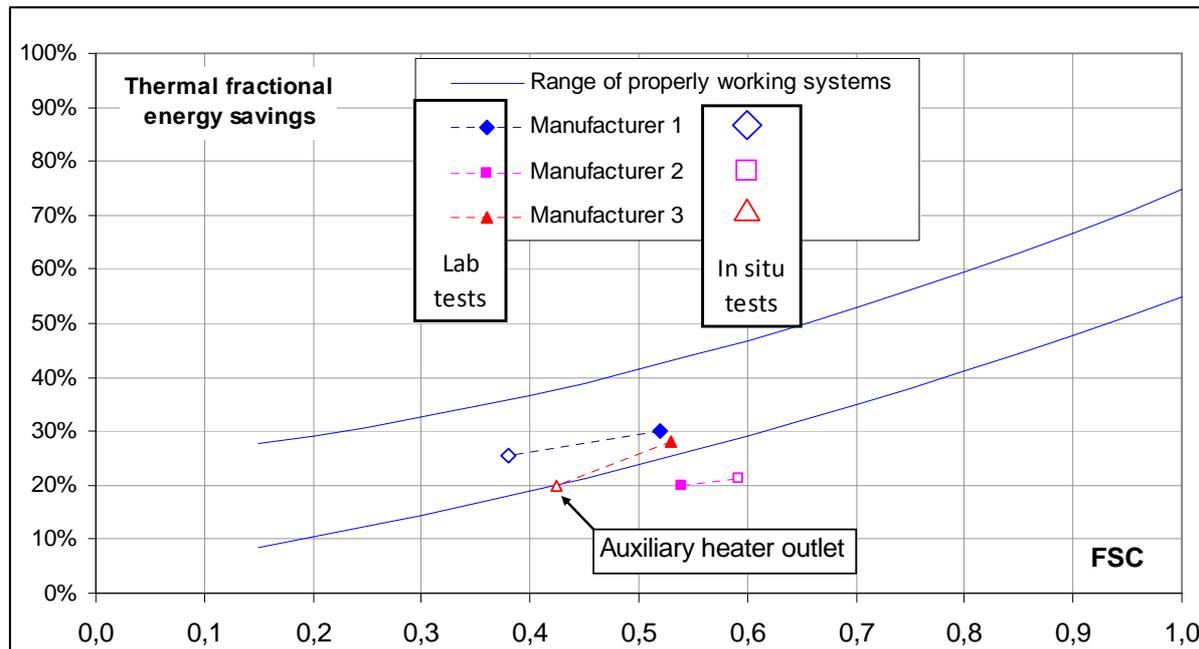


Figure 1-33 Comparaison des points de performances obtenus par des tests SCSPT d'une part, et par des mesures in-situ d'autre part (Source : Combisol)

- Bilan

Pour résumer, les résultats de la méthode SCSPT sont très prometteurs. D'un point de vue numérique, la sélection de données météorologiques semble pertinente pour l'évaluation des performances annuelles des SSC. Ses résultats expérimentaux sont proches des résultats de la méthode CTSS quand celle-ci est ajustée pour prendre en compte les déperditions des circuits hydrauliques et les imperfections de régulation. Pour trois SSC, les performances évaluées en laboratoire sont cohérentes avec les mesures de suivi in-situ.

Cependant, il semble impossible pour l'instant de caractériser complètement les performances de SSC avec la procédure actuelle de la méthode SCSPT. Même avec l'aide d'outil comme le « COMBI-EN tool », les résultats fiables sont limités à des environnements proches des conditions de tests.

Il manque donc une extension puissante à la méthode SCSPT pour pouvoir généraliser les résultats de ses tests et permettre la caractérisation fiable et complète des SSC. C'est ce que nous avons développé dans les travaux de recherche présentés dans ce mémoire.

1.3. Conclusion du chapitre

Les SSC, systèmes utilisant l'énergie solaire pour couvrir une partie des besoins de chauffage et de production d'ECS d'un bâtiment, ont un principe de fonctionnement relativement simple mais assez difficile à mettre en œuvre pour avoir un fonctionnement réellement efficace. Aucune solution ultime n'existe et chaque fabricant propose sa propre réponse technique aux enjeux des SSC. Ainsi existe-t-il de nombreux modèles de SSC, chacun adoptant une conception hydraulique et une stratégie de gestion des flux de chaleur particulière.

Ce type de système peut avoir un fort potentiel de réduction de la consommation en énergie primaire d'un bâtiment. Bien que prometteur, le marché des SSC ne connaît pas un développement aussi rapide que les autres technologies solaires thermiques. Ceci vient très probablement d'un manque de connaissances envers ces systèmes complexes qui nécessitent un investissement assez important. Face à une offre technologique très variée, les utilisateurs potentiels n'ont pas d'outils fiables pour un choix de système.

Connaître les SSC est d'autant plus compliqué que leurs performances sont très sensibles à leur dimensionnement, à leur installation et surtout aux conditions énergétiques auxquels ils sont confrontés (climat et qualité du bâtiment). La méthode FSC permet de représenter simplement les performances des SSC quel que soit l'environnement, grâce à leur courbe caractéristique. Toutefois, il n'y a aujourd'hui aucun moyen de construire ces courbes à partir d'essais ou de mesures directes.

Des essais d'évaluation des performances des SSC sont en cours de développement actuellement. Deux approches de tests adoptent des stratégies complètement différentes mais malheureusement, elles présentent toutes les deux des inconvénients :

- L'approche « composant » est flexible mais ne prend pas en compte les réelles interactions entre les éléments du système ;
- L'approche « globale » est plus fiable mais donne des résultats limités à un climat et un bâtiment.

La méthode SCSPT semble être sur une bonne voie pour évaluer correctement les performances des SSC, mais elle ne pourra être acceptée par la communauté scientifique et industrielle que si elle est accompagnée d'une méthodologie d'extrapolation permettant d'évaluer les performances dans des conditions autres que celles utilisées pendant la phase de test.

Nous proposons, au travers des travaux de recherche de cette thèse, une extension de la procédure de la méthode SCSPT, pour rendre cette dernière capable d'évaluer les performances annuelles des SSC dans n'importe quelle condition énergétique. Cette amélioration repose sur une analyse plus complète des données enregistrées lors du test SCSPT, aboutissant sur l'identification d'un modèle global évolué qui intègre équations caractéristiques des éléments du système et réseaux de neurones artificiels. Elle permettrait ainsi la caractérisation complète des SSC.

CHAPITRE 2. Identification d'un modèle global de SSC à partir de données expérimentales

Résumé du chapitre

L'objectif final des travaux de recherche présentés dans ce mémoire est de proposer une méthode qui permette de caractériser complètement les performances des SSC à partir d'essais en laboratoire, pour renforcer le marché de ces produits, pénalisé, entre autres, par un manque de normes et de repères à fournir aux potentiels utilisateurs.

Compte tenu du potentiel existant à ce jour dans le domaine des tests de performance des SSC, nous avons décidé de nous appuyer sur la méthode SCSPT, d'approche « globale », qui présente des résultats prometteurs mais limités à un seul jeu de conditions aux limites, soit une seule condition énergétique par test. L'idée à l'origine de la méthodologie développée dans ce chapitre est venue d'une simple observation : beaucoup de données sont enregistrées pendant les tests de la méthode SCSPT pour ne donner qu'un résultat global au final, alors qu'il y aurait beaucoup plus à apprendre sur le comportement du SSC.

La solution envisagée pour dépasser les limites de la méthode SCSPT est de passer par une modélisation « globale » du système à partir des données de son test, c'est-à-dire une modélisation considérant le système comme un ensemble unique, et non pas comme l'assemblage de ses différents éléments modélisés indépendamment les uns des autres. Une telle application lors de tests du type « approche globale » permettrait d'avoir la flexibilité de la méthode CTSS (modélisation du système) tout en gardant la fiabilité des résultats de la méthode SCSPT (test du système en situation quasi-réelle). Utiliser le modèle ainsi obtenu pour simuler le comportement du système testé permettrait de caractériser les performances de celui-ci.

Pour cela, la modélisation de processus en général est étudiée dans cette partie. En considérant que le fonctionnement de certains éléments du SSC (notamment les capteurs et les émetteurs) est déjà bien connu et que les flux de chaleur au sein du système sont gérés de manière non-linéaire, une structure particulière de modèle est envisagée. Le modèle global mis en place dans ce chapitre est un modèle « Boîte grise » constitué :

- d'une partie « Boîte Blanche » rassemblant les équations caractéristiques des besoins, des ressources et du stockage. Les « sous-modèles » de la partie « Boîte Blanche » s'inspirent autant que possible d'équations présentes dans différentes normes pour favoriser la visibilité et la reconnaissance de la méthode ;

- d'une partie « Boîte Noire » traduisant les comportements du SSC et sa gestion de flux d'énergie. Cette partie sera celle à identifier à l'aide d'une analyse de données expérimentales. Au vu des avantages que présentent les réseaux de neurones et de leur utilisation de plus en plus fréquente dans le domaine du solaire, cette forme de modélisation est envisagée dans cette partie.

CHAPITRE 2

Une procédure a été mise en place pour entraîner et sélectionner un modèle global du SSC testé à partir de ses données de test.

2.1. Modélisation de processus

La technique envisagée dans ce projet pour pouvoir caractériser complètement les performances de SSC de manière fiable repose sur l'identification d'un modèle global de ces systèmes. L'identification se fera à partir de données expérimentales issues d'un test ne durant pas plus d'une quinzaine de jours. Le modèle identifié doit ensuite être capable d'estimer leurs performances quelles que soient les conditions aux limites.

Pour cela, il faut tout d'abord savoir quels sont les méthodes et modèles existants permettant de reproduire correctement le comportement de systèmes complexes tels que les SSC.

2.1.1. Les principes généraux de modélisation

La présentation ci-dessous des principes généraux de modélisation est inspirée de [Walter et Pronzato, 1994], [Sjöberg et al., 1995], [Oussar, 1998] et [Lucea, 2006].

2.1.1.1. Processus et modèle

Un processus peut être de nature diverse (physique, chimique, industriel, financier,...). Il est caractérisé par :

- Ses sorties y , résultats du processus, grandeurs d'intérêts supposées mesurables ;
- Ses entrées, ensemble des actions ayant une influence sur les sorties du processus. Il est possible de distinguer deux types d'entrées :
 - Les entrées u , mesurables et éventuellement contrôlables par l'utilisateur
 - Les entrées b , sur lesquels il n'est pas possible d'agir, considérées comme des perturbations (également appelé bruits). Ces perturbations peuvent être aléatoires ou déterministes, mesurables ou non mesurables.

Un modèle de processus est une description mathématique de son fonctionnement, qui permet de rendre compte des relations existant entre ses entrées et ses sorties.

2.1.1.2. Classification générale des modèles

La classification générale des modèles peut se faire selon l'objectif d'utilisation du modèle et selon le niveau de connaissance introduit dans les relations mathématiques.

- Selon l'objectif de la modélisation
 - Modèle de simulation ou « Simulateurs »

Un modèle peut être utilisé pour simuler un processus (par exemple pour de la prévision à long terme, du diagnostic de panne, de l'aide à la conception,...). L'objectif dans ce cas est de faire fonctionner le modèle indépendamment du processus, sans qu'aucune mesure ne soit nécessaire pendant sa simulation.

- Modèle de prédiction ou « Prédicteur »

Un modèle peut être utilisé pour estimer les sorties à venir d'un processus en connaissant celles-ci aux instants précédents (par exemple pour du contrôle/commande). Dans ce cas le modèle est utilisé en parallèle du fonctionnement du processus en intégrant les sorties passées mesurées comme entrées du modèle.

Les exigences des résultats attendus du modèle vont dépendre de l'objectif de la modélisation. Dans le cadre de cette thèse, la modélisation de SSC a pour objectif la prévision à long terme de leurs performances. Les exigences des modèles « simulateurs » vont donc être prises en compte.

- Selon la connaissance introduite dans le modèle
 - Modèle phénoménologique ou « Boîte Blanche »

Les modèles « Boîte Blanche » sont des modèles de connaissance, construits à partir d'une analyse appliquant soit des lois générales fondées sur des principes (mécanique, thermodynamique,...), soit des lois empiriques (finance, économie,...), qui régissent les phénomènes intervenant au sein du processus étudié.

L'idéal serait de toujours établir ce genre de modèle pour le processus étudié mais celui-ci peut être trop complexe ou être régi par des phénomènes encore trop peu connus pour qu'il soit possible d'établir un modèle phénoménologique suffisamment précis pour l'application considérée. Il faut dans ce cas se tourner vers des modèles plus empiriques, fondés exclusivement sur les résultats de mesures effectuées sur le processus.

- Modèle comportemental ou « Boîte Noire »

Les modèles « Boîte Noire » se bornent à reproduire un comportement observé, sans requérir aucune connaissance a priori sur le processus ayant généré les données. Il n'est même pas nécessaire de savoir ce que représente la sortie, ni en quelle unité elle est exprimée. La structure du modèle ne prétend en rien correspondre à celle du processus. Ses paramètres ne sont donc pas clairement reliés au processus étudié.

Le principe dans ce cas est de relier les entrées aux sorties par des équations paramétrées et d'estimer ces paramètres à partir de mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision possible avec le plus petit nombre de paramètres ajustables. Le domaine de validité d'un tel modèle ne peut s'étendre au-delà du domaine des entrées qui est représenté dans les mesures utilisées pour l'apprentissage.

- Modèles « Boîte Grise »

Les modèles « Boîte Grise » se situent entre les deux extrêmes du « spectre » des classes de modèles présentés ci-dessus. Lorsque des connaissances sur le processus sont disponibles mais insuffisantes pour concevoir un modèle « Boîte Blanche » satisfaisant, il peut être intéressant de passer par une modélisation « Boîte Grise » qui prend à la fois en considération des connaissances et des mesures. Une telle démarche peut concilier les avantages de l'intelligibilité d'un modèle de connaissance avec la souplesse d'un modèle comportant des paramètres ajustables.

Au sein des modèles « Boîte Grise », il est possible de différencier des sous-catégories, nommées différemment selon les auteurs. Par exemple, [Sjöberg et al., 1995] en distinguent deux principales :

CHAPITRE 2

- Les modèles « Boîte Grise » physiques sont construits autour de relations physiques connues du processus avec un certain nombre de paramètres inconnus à identifier.
- Les modèles « Boîtes Grises » semi-physiques sont construits autour d'intuitions concernant le processus qui suggèrent une certaine mise en forme des entrées mesurées (combinaisons de données par exemple). Le modèle ainsi obtenu est traité comme un modèle « Boîte Noire » par la suite.

D'autres nuances de modèles « Boîte Grise » peuvent encore être définies, comme dans [Ljung, 2010]. Mais quel que soit le cas, l'auteur montre qu'il est préférable d'utiliser ce type de modèle car l'utilisation de relations pertinentes permet de réduire autant que possible sa complexité, ce qui favorise grandement son apprentissage (voir le principe d'« approximation parcimonieuse » évoquée dans la section 2.1.1.3 ci-dessous). L'utilisation de ce genre de modèle est certes avantageuse mais n'est pas forcément aisée, en termes de coût et de lourdeur des calculs.

Dans le cadre de ce projet, un modèle « Boîte Blanche » n'est pas envisageable. Cela supposerait que le fonctionnement réel (et pas seulement théorique) de tous les SSC puissent être mis en équations parfaitement connues. Il suffirait alors de mesurer certains paramètres pour caractériser les SSC. Or nos travaux de recherche portent justement sur la prise en compte du comportement réel des SSC car celui-ci fausse l'évaluation de leurs performances via des modèles usuels (voir les limites de la méthode CTSS dans le paragraphe 1.2.1).

Par contre, certaines équations permettent d'exprimer en partie les flux de chaleur au sein du système. La gestion réelle de ces flux est en fait la partie importante et inconnue à caractériser à la manière d'un modèle « Boîte Noire ». Il est donc envisageable de tirer profit des avantages d'une modélisation « Boîte Grise ».

2.1.1.3. Choix d'une structure de « modèle-hypothèse »

La conception d'un modèle, quel que soit sa classe, conduit forcément à émettre des hypothèses sur les relations entre les entrées et les sorties du processus. Dans le cadre d'un modèle de connaissance, ces relations découlent directement de la mise en équation du processus. Pour les autres modèles, les informations disponibles sur la nature du processus vont aider à mettre en forme les relations mathématiques pour postuler, ce que [Oussar, 1998] appelle un « modèle-hypothèse », c'est-à-dire la relation déterministe liant les entrées aux sorties que l'on suppose a priori.

La règle fondamentale à suivre dans toute construction d'un approximateur, et qui va jouer un rôle important dans le choix du « modèle-hypothèse », est la recherche de l'approximation la plus parcimonieuse : le modèle le plus apte à apprendre correctement et à généraliser des connaissances est celui qui met en jeu le moins de paramètres ajustables possibles. Ceci va dépendre de la complexité du processus et du nombre de données disponibles.

Considérons les entrées et sorties observées sur le processus (équation (2-1)).

$$\begin{aligned} u^t &= [u(1) \quad u(2) \quad \dots \quad u(t)] \\ y^t &= [y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(t)] \end{aligned} \quad (2-1)$$

L'objectif d'une modélisation est de faire le lien entre les entrées et les sorties.

$$y(t) = \hat{y}(t) + \varepsilon(t) = g(u^t, y^{t-1}, \theta) + \varepsilon(t) \quad (2-2)$$

La fonction $\varepsilon(t)$ est l'erreur de prédiction de la sortie $y(t)$. Ainsi, pour avoir un bon modèle, il faut déterminer la fonction g qui, avec le jeu de paramètre adéquat θ , minimise la fonction $\varepsilon(t)$. Pour une famille de fonction g fixée, il existe plusieurs algorithmes qui déterminent le vecteur θ optimisant une norme donnée (voir le paragraphe 2.3.1).

Globalement, une modélisation se résume à choisir une structure (modèle-hypothèse) et à l'adapter aux données disponibles par estimations de paramètres (apprentissage). Cette dernière partie ne pose pas de problème majeur. Elle se résume à un choix de méthode d'identification. Ses résultats dépendent essentiellement de la structure de modèle sélectionnée, qui est donc l'étape déterminante dans le processus de modélisation.

La famille de structure $g(u^t, y^{t-1}, \theta)$ est très générale. Selon [Sjöberg et al., 1995], il est possible de décomposer un choix de modèle-hypothèse pour une identification de processus en deux applications :

- Une application qui construit un vecteur $\varphi(t)$ appelé vecteur de régression, à partir des observations u^t et y^{t-1} ;
- Une application g qui transpose le vecteur de régression vers l'espace de sortie.

$$\begin{aligned} g(u^t, y^{t-1}, \theta) &= g(\varphi(t), \theta) \\ \varphi(t) &= \varphi(u^t, y^{t-1}) \end{aligned} \quad (2-3)$$

Le choix d'un modèle-hypothèse se décompose ainsi en deux sous-problèmes : choisir $\varphi(t)$ et choisir $g(\varphi)$. En fonction des hypothèses retenues pour modéliser le processus, ces applications vont prendre des formes particulières :

- Modèle statique ou dynamique ?

Un modèle dynamique considère des relations entre la prédiction des sorties et les observations passées (comme l'exprime la forme générale (2-2)), alors qu'un modèle statique ne considère que les observations instantanées. Les seuls liens qui existent relient alors $y(t)$ à $u(t)$ dans ce cas (voir la forme globale d'un modèle statique décrite par l'équation (2-4)).

$$y(t) = g(u(t), \theta) + \varepsilon(t) \quad (2-4)$$

L'objectif d'un modèle de SSC, pour caractériser ses performances, est d'estimer correctement l'énergie primaire consommée par le système d'appoint sur une année quelles que soient les conditions aux limites (voir paragraphe 1.1.3.3). Envisager un modèle statique pour cet objectif n'est pas possible puisque l'inertie thermique des

CHAPITRE 2

SSC joue un rôle important dans leur fonctionnement. Pour négliger l'effet de l'inertie, il serait possible de considérer un modèle adapté à un pas de temps long (annuel par exemple) mais cela suppose que les données à long terme du SSC à tester, confronté à plusieurs environnements, soient disponibles pour son identification. Le modèle de SSC construit dans ce chapitre est donc dynamique.

- Représentation entrée/sortie ou représentation état ?

La représentation générale d'un modèle dynamique peut se faire de deux façons, qui pourront être plus ou moins utiles selon les connaissances disponibles sur le modèle.

L'état d'un processus, x , est défini comme la quantité d'information minimale nécessaire pour prédire son comportement, étant donné les entrées présentes et futures. Par définition, l'ordre du modèle est la dimension du vecteur d'état. Une représentation d'état est exprimée par l'équation (2-5).

$$\begin{aligned}x(t) &= f(x(t-1), u(t-1), \theta) \\ \hat{y}(t) &= g(x(t), u(t), \theta)\end{aligned}\tag{ 2-5 }$$

Dans le cas d'une représentation entrée/sortie, le vecteur de régression est composé des sorties observées sur les N_s derniers pas de temps et des entrées observées sur les N_e derniers pas de temps. N_s et N_e caractérisent l'ordre du modèle. Une représentation entrée-sortie est exprimée par l'équation (2-6).

$$\begin{aligned}\hat{y}(t) &= g(\varphi(t), \theta) \\ \varphi(t) &= \varphi([y(t-N_s) \quad \dots \quad y(t-1)], [u(t-N_e) \quad \dots \quad u(t-1)])\end{aligned}\tag{ 2-6 }$$

Une représentation peut être plus pratique qu'une autre en fonction des connaissances a priori du processus à modéliser. Néanmoins, les vecteurs de régression exprimant les états du processus sollicitent moins de variables, ce qui peut rendre le modèle beaucoup plus efficace, comparé à un modèle basé sur la représentation entrée-sortie qui utilise les même blocs de variables, mais en décalé.

- Modèle déterministe ou stochastique

Les modèles déterministes décrivent leurs sorties comme si elles étaient uniquement fonction d'entrées maîtrisées. Ces modèles sont souvent irréalistes puisqu'il existe très souvent diverses perturbations (ou bruits, comme évoqués dans la section 2.1.1.1 ci-dessus) agissant sur le système ou faussant les mesures.

Pour avoir un modèle plus réaliste, les perturbations b sont souvent décrites de manière statistique, à l'aide d'une représentation stochastique (c'est-à-dire par des suites de variables aléatoires comme le bruit blanc par exemple).

Dans le cas de modèles linéaires, les structures stochastiques usuelles peuvent être toutes exprimées de la manière suivante :

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}b(t)\tag{ 2-7 }$$

L'opérateur de décalage temporel est ici appelé q . $A(q)$ par exemple est un polynôme en q^{-1} .

Des cas spéciaux très connus, ayant leurs méthodes d'identification spécifiques, sont rapidement présentés dans le Tableau 2-1.

Conditions sur les fonctions de transfert	Nom de la structure de modèle
A=1	Modèle de Box-Jenkins (BJ)
F=D=1	Modèle AutoRégressif à Moyenne Ajustée et variable eXogène (ARMAX)
A=C=D=1	Modèle Output Error (OE)
F=C=D=1	Modèle AutoRegressif à variable eXogène (ARX)

Tableau 2-1 Exemple de modèles stochastiques linéaires usuels

Dans ce cas général, les composants du vecteur de régression sont :

- Les entrées passées, $u(t-k)$, associés au polynôme B ;
- Les sorties passées, $y(t-k)$, associés au polynôme A ;
- Les sorties simulées à partir des entrées passées uniquement, $\hat{y}_u(t-k, \theta)$, associées au polynôme F ;
- Les erreurs de prédictions, $\varepsilon(t-k) = y(t-k) - \hat{y}(t-k, \theta)$, associées au polynôme C ;
- Les erreurs de simulations, $\varepsilon_u(t-k) = y(t-k) - \hat{y}_u(t-k, \theta)$, associées au polynôme D.

Ces considérations sont surtout importantes dans la mise en place de prédicteurs capables d'évaluer leurs erreurs de prédiction à chaque pas de temps, quand l'incertitude sur les commandes est trop importante. Dans le cadre de la modélisation de comportement d'un SSC, destiné à de la simulation pure, sans contrôle d'erreur instantané, pour essentiellement évaluer des consommations annuelles d'énergie, un modèle déterministe suffit.

- Modèle linéaire ou non linéaire ?

La plupart des processus nécessiteraient des modèles non linéaires s'il fallait les décrire de manière précise dans la totalité de leur domaine de fonctionnement. La plupart des modèles linéaires constituent des approximations valables dans un domaine plus ou moins restreint, ce qui peut suffire pour les objectifs de la modélisation recherchée.

Il convient de distinguer deux types de linéarité. Une structure sera dite linéaire par rapport aux entrées (LE) si sa sortie vérifie le principe de superposition par rapport aux entrées.

$$\forall \lambda, \mu \in \mathfrak{R}, g(\lambda.u_1 + \mu.u_2, \theta) = \lambda.g(u_1, \theta) + \mu.g(u_2, \theta) \quad (2-8)$$

CHAPITRE 2

Une structure de modèle sera dite linéaire par rapport à ces paramètres (LP) si sa sortie vérifie le principe de superposition par rapport aux paramètres.

$$\forall \lambda, \mu \in \mathfrak{R}, g(u, \lambda.\theta_1 + \mu.\theta_2) = \lambda.g(u, \theta_1) + \mu.g(u, \theta_2) \quad (2-9)$$

Les structures LE bénéficient de l'existence de résultats mathématiques très puissants qui facilitent leur étude théorique (stabilité, commande optimale, comportement en présence de perturbations...) mais cette forme de linéarité a souvent un domaine de validité limité car la plupart des processus réels devient non-linéaire quand ils sont soumis à des entrées d'amplitude suffisamment importante.

L'estimation des paramètres des structures LP est aisée et il est souvent possible d'utiliser une formule explicite évitant toute procédure itérative. En effet, dans ce cas, l'application g peut être définie comme une simple combinaison linéaire entre les paramètres du modèle et le vecteur de régression.

$$g(\varphi(t), \theta) = \theta^T . \varphi(t) \quad (2-10)$$

Des méthodes simples, telle que la méthode des moindres carrés, peuvent être facilement applicables dans ces conditions (voir paragraphe 2.3.1).

En considérant les fonctionnements standards que peuvent avoir les SSC et le domaine large des entrées qu'il faudra utiliser pour estimer leurs performances quelles que soient les conditions, une structure non LE et non LP doit être envisagée. Dans ces conditions, g ne peut se résumer à une simple application linéaire. Une telle structure nécessite l'utilisation de méthodes plus poussées que les outils classiques de modèles linéaires, en termes de construction et d'identification.

2.1.2. La modélisation non-linéaire dans les domaines du solaire

La mise en place et l'identification de modèles non-linéaires ne sont pas triviales. Pour choisir la forme du modèle apte à reproduire le comportement de n'importe quel SSC à partir d'une séquence « 12 jours » (voir paragraphe 1.2.2), il est possible de s'inspirer de travaux réalisés dans des domaines de recherche proches.

Dans le domaine général de l'énergie solaire, il ressort que l'identification de modèles non-linéaires est souvent utilisée pour des applications de type prévision d'ensoleillement, caractérisation de capteurs et estimation de performances de systèmes complets à long terme. Quelques exemples récents sont résumés ci-dessous.

- Prévision d'ensoleillement

[Mellit et Massi Pavan, 2010] et [Paoli et al., 2010] ont cherché un moyen de prévoir l'ensoleillement moyen quotidien pour anticiper la production de centrales photovoltaïques connectées aux réseaux électriques généraux (à Trieste pour le premier, à Ajaccio pour le second).

Dans leur étude bibliographique, Mellit et Massi Pavan ont examiné quelques projets de prévision d'ensoleillement utilisant des techniques de « logique floue », de « chaînes de Markov » et de « réseaux de neurones artificiels ». Cette dernière technique semble être la plus utilisée dans le domaine et a été choisie par les

auteurs. Paoli a étudié en parallèle plusieurs techniques d'analyse temporelle pour la prévision d'ensoleillement : la méthode classique de type « ARIMA » (modèle stochastique AutoRegressif à Moyenne Ajustée), l'« inférence Bayésienne », les « chaînes de Markov », les « k plus proches voisins » et les « réseaux de neurones artificiels ». La conclusion de cette étude comparative est que les réseaux de neurones donnent les meilleurs résultats et sont donc même plus précis que certaines méthodes classiques de prévision.

Finalement, ces deux projets ont retenu des modèles type réseaux de neurones. Bien que les architectures envisagées soient différentes, les résultats sont pertinents dans les deux cas.

- Caractérisation de capteurs

[Baccoli et al., 2010] ont caractérisé les performances à l'état stationnaire d'un capteur thermique à tube sous-vide. Cette caractérisation est basée sur la modélisation du capteur à partir de données expérimentales issues de 4 jours de suivi du capteur en fonctionnement normal (et donc en régime dynamique).

Deux types de modèles ont été testés : un modèle « Boîte Grise » (basée sur des équations physiques détaillées connues avec identification de certains paramètres) et un modèle de réseau de neurones dynamique adaptatif. Le choix de ce dernier type de modèle résulte d'une étude bibliographique montrant que les réseaux de neurones ont été largement utilisés avec succès pour la caractérisation de performances de capteurs thermiques de toutes sortes.

Les deux modèles ont montré de bons résultats, proches de la courbe caractéristique officielle obtenue à partir de la norme EN 12975. Le modèle « Boîte Grise » est un peu plus précis ce qui laisse suggérer qu'utiliser les connaissances disponibles, même incomplètes, aide la modélisation du système.

- Estimation de performances de systèmes à long terme

[Souliotis et al., 2009] ont modélisé un prototype de capteur auto-stockeur pour estimer ses performances. Pour cela, des données venant d'un suivi in situ pendant plus d'un an ont été collectées.

La technique retenue pour ce projet est appelée « Group Method Data Handling » (GMDH). Elle peut être comparée à un algorithme génétique appliquée à un réseau de neurones pour déterminer le meilleur vecteur de régression des entrées et identifier une simple application linéaire de ce vecteur. Le résultat ainsi obtenu est un polynôme dont les monômes sont composés de différentes combinaisons des entrées du modèle et de paramètres identifiés.

Le modèle entraîné donne de bonnes estimations de la température moyenne du stockage. Il est ensuite réutilisé dans TRNSYS pour des simulations à long terme, puisqu'aucun type détaillé de ce genre de système n'existe pour le moment.

[Kalogirou et Panteliou, 2000] ont tenté d'obtenir un modèle global de performances à long terme de n'importe quel CESI de type thermosiphon à partir de données issues de simulations d'une trentaine de ces systèmes, testés selon la norme internationale ISO 9459-2, pour trois sites climatiques en Grèce.

Pour cela, deux réseaux de neurones ont été entraînés : le premier pour estimer l'énergie solaire récupérée par ces systèmes pour un puisage de volume égal à la capacité du stockage, et l'autre pour estimer l'énergie solaire récupéré par ces systèmes et la quantité moyenne d'eau chaude mensuelle disponible à des températures de 35 et 40°C. Les données d'entrées sont des valeurs mensuelles de

CHAPITRE 2

phénomènes météorologiques et les principales caractéristiques techniques du CESI thermosiphon dont les performances doivent être estimées.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et permettent d'avoir à disposition un outil rapide de dimensionnement de CESI thermosiphon.

[Medinelli Sanino et Rojas Reischel, 2007] ont modélisé le CESI situé dans leur laboratoire près de Viña del Mar au Chili. Pour avoir un jeu de données suffisamment riche pour l'entraînement, la vitesse de la pompe a été contrôlée selon une séquence particulière de signal appelée « Signal Binaire Pseudo Aléatoire » (SBPA), définie dans [Godfrey, 1993]. L'expérience a duré environ deux jours.

Après avoir testé différentes structures de modèles, les auteurs ont choisi un modèle « Boîte Grise » semi-physique combiné à un réseau de neurones. Les connaissances disponibles sur le système ont permis d'organiser la forme du vecteur de régression des entrées et le réseau de neurones ajuste ces connaissances en une application non-linéaire. Selon les auteurs, cette incorporation de connaissances physiques est avantageuse car elle partage les avantages des structures neuronales et des structures « Boîte Grise », en proposant un modèle à la fois flexible et parcimonieux. Le modèle ainsi entraîné prédit avec une bonne précision la température moyenne du ballon de stockage.

- Bilan

Parmi les types de modélisations non-linéaires qui existent, les réseaux de neurones sont souvent utilisés dans le domaine de l'énergie solaire. Ce type de modèle est très largement exploité actuellement car, comme le souligne [Kalogirou, 2001], ils peuvent apprendre à partir d'exemples, sont tolérants à certains défauts et peuvent s'occuper de problèmes non linéaires. C'est pourquoi ils sont souvent adoptés pour la prédiction de phénomènes complexes et la modélisation de composants et de systèmes complets.

Beaucoup d'autres articles proposent l'utilisation de réseaux de neurones pour des domaines proches de cette thèse. [Kalogirou, 2001] en présente un certain nombre. Ceux présentés ci-dessus révèlent certains points intéressants :

- Des phénomènes très complexes, comme le rayonnement solaire, peuvent être modélisés à l'aide de réseaux de neurones, avec une précision parfois meilleure que les méthodes de prédictions « classiques » ;
- Modéliser et prévoir les performances globales de systèmes semble possible avec les réseaux de neurones. Ceci a été fait de nombreuses fois pour différents types de CESI ;
- Intégrer autant que possible les connaissances disponibles sur le système semble avantageux pour la modélisation d'un système.

Jusqu'à présent, très peu de travaux semblent avoir été fait pour modéliser les SSC de manière globale, avec ou sans l'aide de réseaux de neurones. Les différents points observés à travers les articles précédents nous ont incité à envisager l'utilisation de ce type de structure ainsi que de se rapprocher d'une optique « Boîte Grise » autant que possible pour modéliser les SSC à partir de données expérimentales.

2.1.3. Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles mathématiques fortement inspirés par les neurones biologiques. Leur fonctionnement ressemble à celui d'un cerveau dans le sens où les connaissances sont construites à travers un processus d'entraînement qui renforce les connexions entre certains neurones.

La présentation des réseaux de neurones commence par la présentation de l'élément de base de ce modèle qu'est le neurone mathématique.

2.1.3.1. Qu'est ce qu'un neurone ?

La structure d'un neurone mathématique est représentée sur la Figure 2-1 et est décrite dans [Dreyfus et al., 2002].

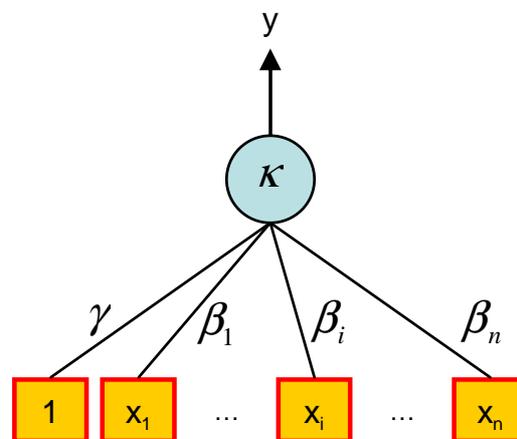


Figure 2-1 Schéma représentant un neurone mathématique

Un neurone mathématique est une fonction κ , excitée par des entrées x_i . Chacune de ces entrées est liée à un paramètre β_i . Le paramètre γ représente le biais de la fonction.

$$y = \kappa(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n; \gamma, \beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_n) \quad (2-11)$$

Le paramétrage d'un neurone peut se faire de manière quelconque. Cependant, une famille de paramétrage classique, appelée « neurones à fonction dorsale », est très largement utilisée pour de la modélisation non linéaire de processus.

Les neurones de cette famille relient les entrées aux paramètres par une simple combinaison linéaire v appelée « potentiel » du neurone (voir Equation (2-12)). Ainsi, les paramètres sont des coefficients de pondération des entrées du neurone, appelés par analogie biologique, « poids synaptiques ».

$$v = \gamma + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad (2-12)$$

Ce potentiel est l'argument d'une fonction d'activation : en fonction de la valeur de son potentiel, un neurone va être activé ou non. Théoriquement, la fonction

d'activation peut être de nature quelconque. Cependant, pour bénéficier de propriétés intéressantes pour la modélisation type « Boîte Noire », certaines fonctions sont plus adaptées comme les fonctions sigmoïdes (en forme de « S »), symétriques par rapport à l'origine. La fonction tangente hyperbolique en est un exemple.

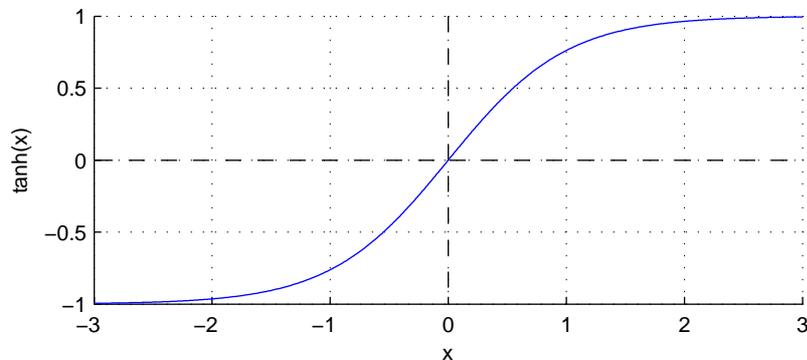


Figure 2-2 Fonction tangente hyperbolique

Dans ce cas, un neurone peut être exprimé par l'équation (2-13).

$$y = \tanh\left(\gamma + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i\right) \quad (2-13)$$

En raison de leurs propriétés d'approximation universelle parcimonieuse (voir paragraphe 2.1.3.3 ci-dessous), les réseaux de neurones fonction dorsale sont bien adaptés à la modélisation non-linéaire de processus. Les réseaux de neurones à fonction sigmoïde en particulier ont été très étudiés comme outils de modélisation dynamique « boîte noire ».

2.1.3.2. Principe et fonctionnement

Un neurone réalise simplement une fonction non-linéaire, paramétrée, de ses variables d'entrées. L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est-à-dire de la composition des fonctions non-linéaires réalisées par chacun des neurones.

Selon [Sjöberg et al., 1995], la quasi-totalité des applications non linéaires utilisées pour de la modélisation de type « Boîte Noire » peuvent se décomposer en une somme de fonctions de base. Si une seule fonction « mère » $\kappa(x)$ est choisie comme base, l'application peut être définie par l'équation (2-14).

$$\hat{y}(t, \theta) = g(\varphi(t), \theta) = \sum_k \alpha_k \kappa(\varphi(t), \beta_k, \gamma_k) \quad (2-14)$$

$$\theta = (\alpha \quad \beta \quad \gamma)$$

Les paramètres β_k et γ_k représentent de manière grossière, respectivement, l'échelle et la translation de la fonction de base κ choisie. Les paramètres α_k adaptent les résultats de chaque fonction de base aux sorties du modèle. Dans l'exemple d'utilisation d'un paramétrage de type fonction dorsale, évoqué dans le

paragraphe 2.1.3.1, la construction entre le vecteur de régression et les paramètres se fait de la manière définie dans l'équation (2-15).

$$\hat{y}(t, \theta) = g(\varphi(t), \theta) = \sum_k \alpha_k \kappa(\beta_k^T \varphi(t) + \gamma_k) \quad (2-15)$$

En prolongeant le raisonnement, il est possible de récupérer les sorties de ces premières fonctions de base pour recréer un deuxième vecteur de régression :

$$\begin{aligned} \varphi_k^{(2)}(t) &= g_k(\varphi(t)) = \kappa(\varphi(t), \beta_k, \gamma_k) \\ \varphi^{(2)} &= [\varphi_1^{(2)}(t) \quad \dots \quad \varphi_n^{(2)}(t)] \end{aligned} \quad (2-16)$$

En réappliquant une deuxième application non-linéaire g sur ce nouveau vecteur de régression, une deuxième couche est créée :

$$g(\varphi, \theta) = \sum_l \alpha_l^{(2)} \kappa(\varphi^{(2)}, \beta_l^{(2)}, \gamma_l^{(2)}) \quad (2-17)$$

Ici, θ représente l'ensemble des paramètres des deux couches. Il est possible de recommencer plusieurs fois la procédure et ainsi d'avoir un réseau multicouche.

Finalement, selon [Sjöberg et al., 1995], une des meilleures stratégies de modélisation de type « Boîte Noire » non linéaire d'un processus est de mettre en réseau une ou plusieurs couches de fonctions, appelées neurones dans la partie précédente. Un réseau de neurone peut alors être représenté par la Figure 2-3.

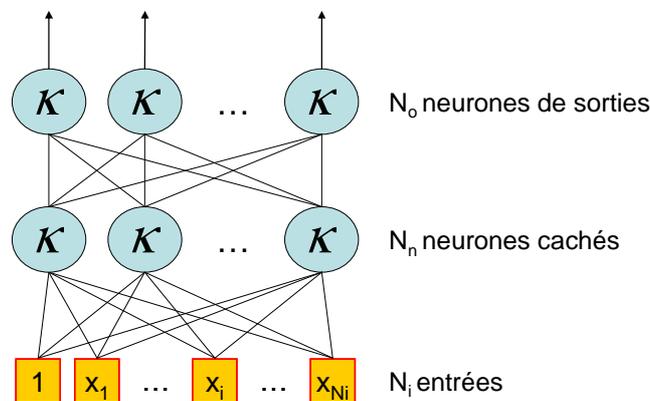


Figure 2-3 Réseau de neurones à N_i entrées, une couche de N_n neurones cachés et une couche de N_o neurones de sorties

Conventionnellement, il existe deux types de neurones dans un réseau :

- Les neurones cachés sont caractérisés par le fait que leurs sorties ne constituent pas les sorties du réseau mais sont utilisées par d'autres neurones ;
- Les neurones de sorties combinent les sorties de neurones cachés pour constituer les sorties du réseau. Pour des réseaux destinés à la modélisation, les neurones de sortie sont généralement des fonctions linéaires.

Globalement, le principe de ce genre de modélisation est de construire un réseau de neurone adéquat, qui correspond le mieux au processus à modéliser, et d'appliquer

CHAPITRE 2

un algorithme d'entraînement à partir d'une séquence de données, qui va déterminer le jeu de poids synaptique optimal. Etant donnée la non linéarité du modèle, l'algorithme d'optimisation sera forcément itératif, ce qui implique quelques difficultés et pièges, notamment celles des minima locaux, mais qui peuvent être surmontées (voir le paragraphe 2.3.1).

La construction d'une structure de réseau se fait en plusieurs étapes :

1. Choisir les entrées et sorties du processus à modéliser ;
2. Construire un vecteur de régression φ ;
3. Choisir le paramétrage des neurones (fonctions d'activation,...) ;
4. Choisir le nombre de neurones et définir les connexions entre eux (en différentes couches par exemple).

Malheureusement, il n'existe pas de méthode théorique prédéfinie pour déterminer la structure de réseau qui convient en fonction du processus à modéliser, notamment le nombre de neurones qui est pourtant un aspect important pour respecter la parcimonie du modèle (voir le dilemme biais-variance dans le paragraphe 2.3.3.1). Il faut donc nécessairement mettre en œuvre une procédure numérique de conception du modèle.

2.1.3.3. Les deux classes de réseaux usuels

Les réseaux de neurones se classent en 2 grandes familles principales.

- Les réseaux de neurones non-bouclés (« feed-forward »)

Un réseau de neurones non bouclé, comme représenté sur la Figure 2-3, est un ensemble de neurones connectés entre eux où l'information circule uniquement dans un seul sens (des entrées vers les sorties) sans retour en arrière. Graphiquement, un tel réseau est acyclique.

Un réseau de neurones non bouclé à couches, dont les neurones cachés ont une fonction d'activation sigmoïde est souvent appelé perceptron multicouche (ou MLP, Multi Layer Perceptron).

Parmi les nombreux modèles non linéaires, neuronaux ou non, qui peuvent être utilisés pour estimer une relation non linéaire, le perceptron à une couche cachée présente des caractéristiques intéressantes : c'est un modèle boîte noire non linéaire, à capacité d'approximation universelle, flexible et parcimonieux :

- [Cybenko, 1989] a montré que le perceptron à une couche cachée est un approximateur universel, c'est-à-dire qu'il permet d'approximer toute fonction non linéaire continue, d'un espace de dimension finie dans un autre, avec une précision arbitrairement fixée ;
- D'autres modèles, tels que les modèles polynomiaux, les séries trigonométriques ou les développements en série de fonctions orthogonales, partagent également la propriété d'approximateur universel. Mais, contrairement à ces modèles, les perceptrons, du fait qu'ils mettent en jeu des paramètres ajustables de manière non linéaire, nécessitent moins de paramètres pour atteindre un même degré d'approximation [Barron, 1993]. En ce sens, ils sont parcimonieux ;

– De plus, ces modèles sont flexibles : plus la relation à modéliser est complexe, plus nombreux seront les neurones et les paramètres dans le modèle neuronal correspondant. Cela signifie que leur complexité interne peut être facilement accrue, sans changer la forme globale du modèle. Ils constituent donc des outils de régression flexibles.

- Les réseaux de neurones bouclés (récurrents)

Un réseau de neurone bouclé est un réseau dont le graphe des connexions est cyclique, c'est-à-dire qu'en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin ramenant vers le point de départ. La sortie d'un neurone est dans ce cas une des entrées d'un neurone « antérieur », voire même une de ses propres entrées, appliquée avec un retard d'au moins un pas de temps. Dans ce cas, la notion de temps est explicitement prise en considération. Ces modèles sont qualifiés de dynamiques.

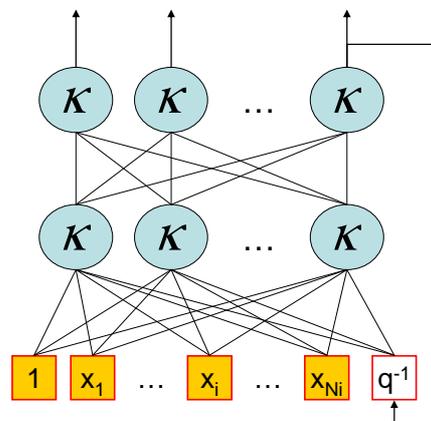


Figure 2-4 Schéma d'un exemple de réseau de neurones récurrent

Les réseaux récurrents peuvent modéliser de manière très efficace n'importe quel système dynamique mais leur principale difficulté réside dans le fait que les techniques d'apprentissage sont très complexes à mettre en place.

2.2. Modélisation globale des SSC

Le projet développé dans cette thèse est de trouver un moyen d'apprendre le comportement des SSC à partir d'un test similaire à la SCSPT. L'idée est de pouvoir identifier un modèle pour chaque SSC testé dans le but de pouvoir simuler leurs comportements quelles que soient les conditions et ainsi caractériser leurs performances. Compte tenu des considérations faites sur la modélisation de systèmes dans le paragraphe ci-dessus, l'identification d'un modèle générique de SSC est proposée dans cette partie.

2.2.1. Description du modèle proposé

2.2.1.1. Entrées et sorties du modèle global

Avant toute construction mathématique d'un modèle de SSC, il faut définir quelles vont être les entrées et sorties du modèle, en fonction des objectifs attendus et des contraintes imposés par les tests.

On attend d'un modèle global de SSC qu'il puisse, après identification, estimer l'énergie d'appoint consommée sur une année pour n'importe quel environnement énergétique (climat, bâtiment, surface de capteur) afin de caractériser ses performances. Pour cela, il est nécessaire que le modèle puisse exprimer les flux énergétiques impliqués dans le fonctionnement du système en fonctions de variables extérieures.

- Les sorties du modèle sont définies comme étant les flux d'énergies contrôlés par le système : d'une part, les flux de chaleur fournis pour répondre aux demandes de chauffage (\dot{Q}_{em}) et d'ECS (\dot{Q}_{dhw}) ; d'autre part, la puissance fournie par les capteurs ($\dot{Q}_{coll,out}$) et le système d'appoint ($\dot{Q}_{aux,out}$). L'appoint est de plus en plus souvent intégré au SSC et sa qualité joue un rôle important dans les performances du système. Il doit autant que possible être considéré comme partie intégrante du système. Dans ce cas, la sortie du modèle de SSC est considérée comme étant la puissance consommée par l'appoint (\dot{Q}_{aux}).

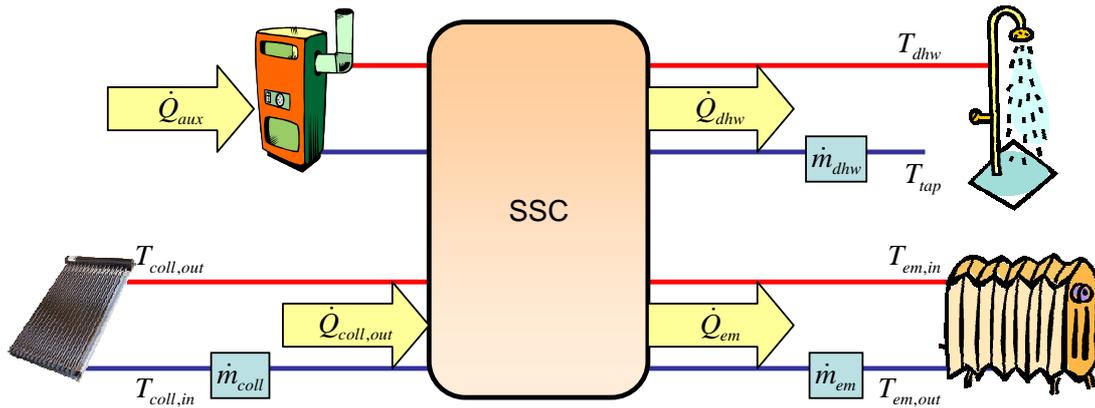


Figure 2-5 Représentation des flux énergétiques caractéristiques du fonctionnement des SSC, considérés comme sorties du modèle (ainsi que des débits et températures nécessaires à leur calcul)

- Les entrées du modèle sont définies comme les variables extérieures, c'est à dire les variables non contrôlées par le système. Ce sont les variables climatiques comme la température extérieure T_a , la position du soleil (définie par l'angle zénithal θ_s et l'azimut solaire γ_s) et les différentes irradiations solaires (au moins les irradiations directes G_b et diffuses G_d sur le plan horizontal), et les variables caractéristiques des besoins en ECS comme le débit de puisage \dot{m}_{dhw} et la température d'eau froide du réseau T_{tap} . Les besoins de chauffage ne sont pas directement pris en compte dans ces variables d'entrées, à l'exception de la température extérieure. La charge de chauffage sera caractérisée par des paramètres (voir paragraphe 2.2.2.3).

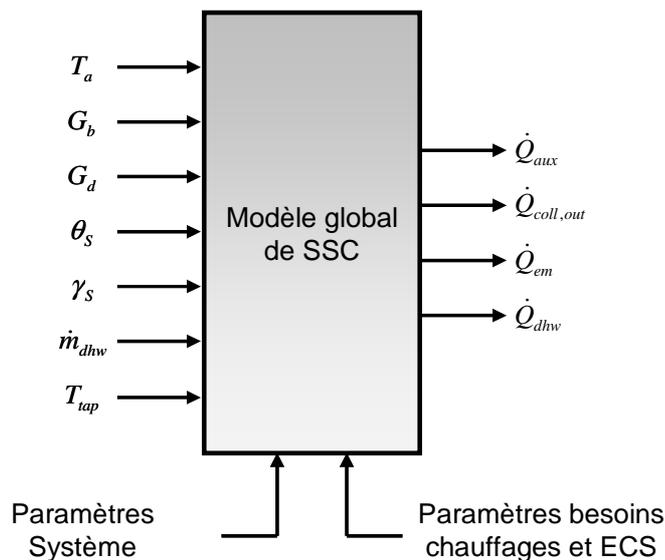


Figure 2-6 Représentation en bloc des entrées, sorties et paramètres du modèle global de SSC envisagé

CHAPITRE 2

Ce jeu de variables est également choisi pour représenter le comportement des SSC aussi simplement que possible pour favoriser la parcimonie du modèle et ainsi faciliter son identification.

Ces variables correspondent aux données disponibles lors des tests de la méthode SCSPT. La philosophie de cette méthode étant de tester les SSC sans interférer dans leur fonctionnement, les seules mesures disponibles sont aux bornes des modules émulateurs (voir paragraphe 1.2.2.1) : débits et différences de température à l'extrémité de chaque circuit et consommation de l'appoint (quelle que soit sa source). Les données des sondes de température et débitmètres propres à la gestion de chaque SSC ne sont pas forcément enregistrées (les éventuelles sondes de températures dans le ballon par exemple). Les variables climatiques et les évolutions des besoins sont directement disponibles dans l'environnement virtuel du test.

2.2.1.2. Structure globale retenue

La structure du modèle proposé ici est inspirée des suggestions de modélisation de la section 2.1. Pour modéliser les SSC de manière correcte à partir des données des tests, le modèle est dynamique et inclut au moins une partie « Boîte Noire » non-linéaire de type réseau de neurones. Pour faciliter l'identification d'un modèle précis, il est nécessaire d'intégrer le plus possible de connaissances du système. Parmi les deux représentations principales de modèles dynamiques (voir paragraphe 2.1.1.3), la représentation d'état semble intéressante pour envisager une modélisation « Boîte Grise ».

Une analogie entre cette représentation et le fonctionnement réel d'un SSC a inspiré la structure de modèle proposé ici. Généralement, les flux énergétiques au sein du système sont contrôlés en fonction des températures des différents éléments propres au système ou en interaction avec lui : capteurs, stockage, émetteurs de chaleur, bâtiment. Elles donnent des informations concernant les flux énergétiques attendus, stockés et disponibles. Il semble donc pertinent d'envisager ces températures comme les états du système. Cette idée est d'autant plus intéressante que les températures moyennes de chacun de ces éléments peuvent être estimées grâce leurs équations caractéristiques déjà connues. En reprenant l'équation (2-5) il est envisageable d'exprimer l'application f comme un modèle « boîte blanche ».

Le vrai fonctionnement caractéristique de chaque SSC est sa manière de gérer les différents flux énergétiques en fonction des variables extérieures et de son propre état. Ainsi, l'application g de l'équation (2-5)) est le modèle « boîte noire » non linéaire que l'on doit identifier grâce aux données de test.

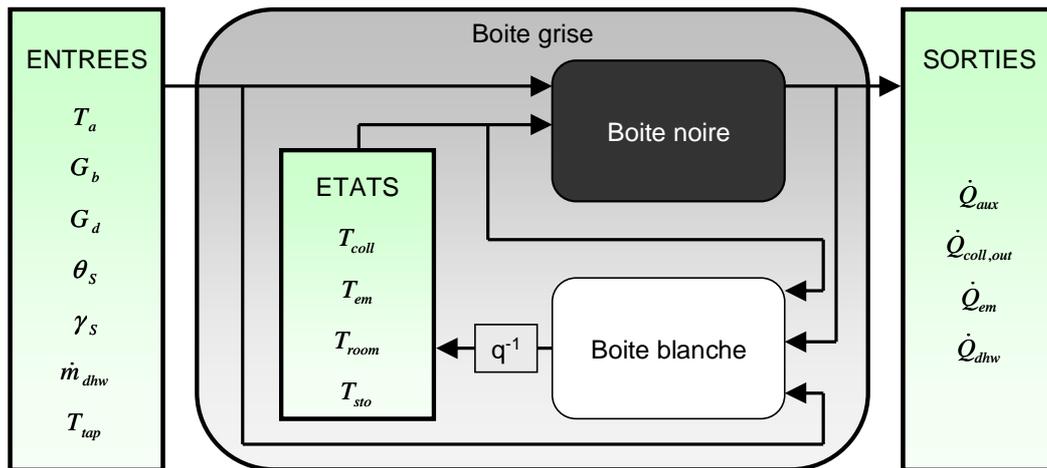


Figure 2-7 Schéma du modèle global de SSC envisagé

De cette manière, le modèle envisagé peut être classé comme un modèle « Boîte Grise » orientée « Bloc » (« block oriented slate-grey model ») selon [Ljung, 2010] : l'application f est considérée comme un bloc linéaire dynamique tandis que l'application g est considérée comme un bloc non-linéaire statique. Des modèles de cette classe ont déjà été utilisés avec succès dans plusieurs contextes.

2.2.2. La partie « Boîte Blanche »

La partie « Boîte Blanche » a pour objectif d'évaluer les températures moyennes des capteurs, du stockage, des émetteurs et du bâtiment, d'un pas de temps sur l'autre. Ceci doit être fait uniquement avec les variables présentées dans le paragraphe 2.2.1.1 et des paramètres standards déjà connus des éléments. Aucun paramètre de cette partie du modèle ne doit être identifié à partir de tests supplémentaires. Certains peuvent être éventuellement mesurés.

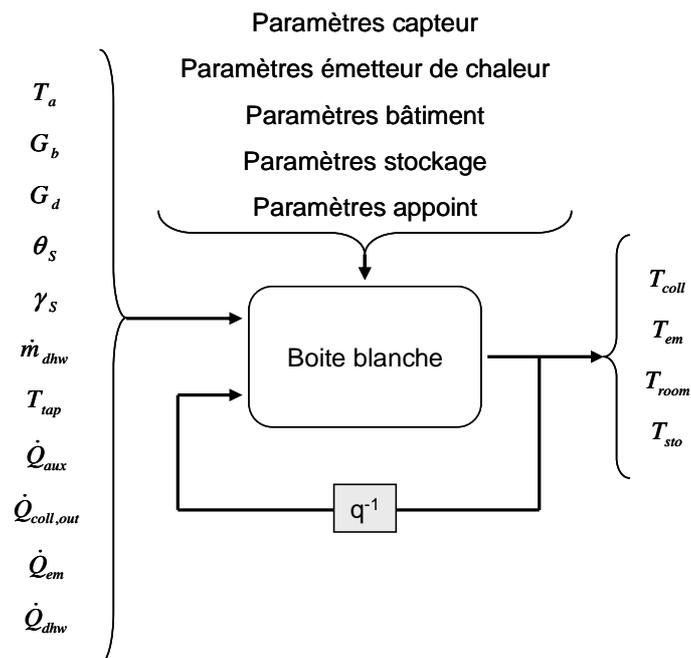


Figure 2-8 Schéma du principe du modèle "Boîte blanche"

La construction du modèle générique envisagé (voir Figure 2-7) rend la partie « Boîte Blanche » assez flexible : il est possible de la modifier ou de la compléter en fonction du système que l'on veut étudier. Cependant, dans le cadre de ces travaux de recherche, nous nous sommes volontairement limités à la configuration présentée ci-dessous, qui offre un caractère suffisamment générique pour permettre de prendre en compte l'ensemble des SSC sur le marché.

De manière générale, dans l'optique d'adapter la démarche « globale » de la méthode SCSPT (voir paragraphe 1.2.2) en une approche de standardisation, la partie « Boîte Blanche » va utiliser autant que possible des modèles d'éléments de SSC reconnus au niveau des normes.

D'un point de vue numérique, les équations présentées ci-dessous sont calculées avec un schéma de discrétisation explicite.

2.2.2.1. Méthodologie de validation des modèles

Pour contrôler la cohérence des « sous-modèles » de la partie « Boîte Blanche » (c'est-à-dire les modèles des différents éléments des SSC), les résultats de ces derniers sont comparés aux résultats de modèles TRNSYS couramment utilisés pour les simulations de SSC, notamment dans le cadre de la tâche 32. Les comparaisons se font sur la base de simulations du SSC de référence défini dans le cadre de cette tâche [Heimrath et Haller, 2007]. C'est un système du type C2 selon la classification du projet Combisol (voir paragraphe 1.1.1.3 et la Figure 2-9 ci-dessous).

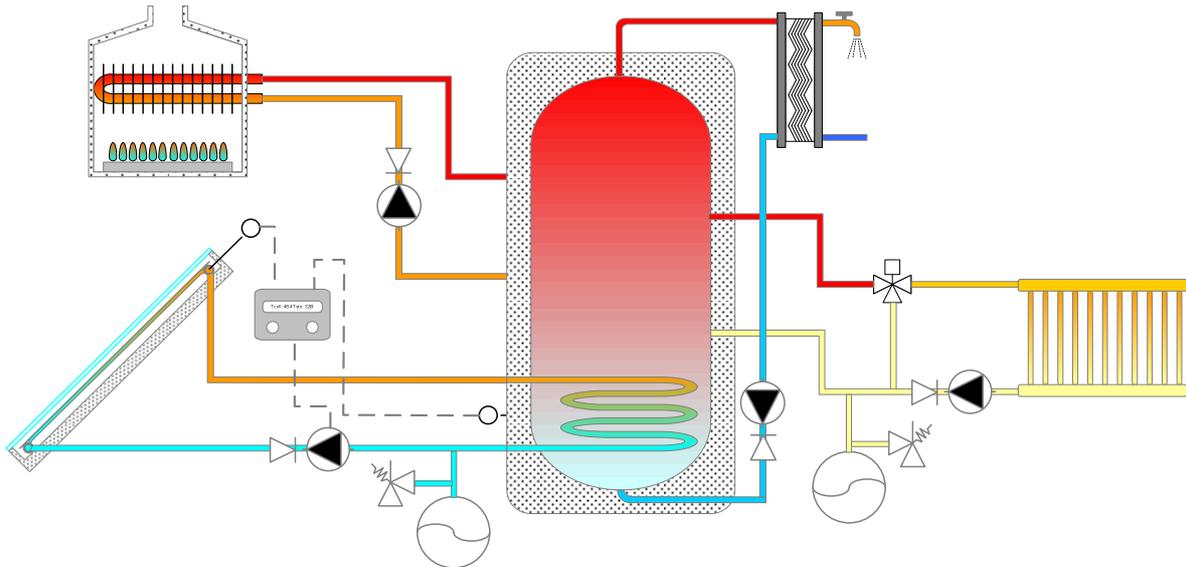


Figure 2-9 Schéma hydraulique des SSC du type C2 selon le projet Combisol

Les paramètres des éléments de ce SSC sont décrits en détail dans le paragraphe 3.2.1. Son fonctionnement est simulé sur une année, avec un pas de temps de 3 minutes (pas de temps par défaut), pour 3 climats (Stockholm, Zurich et Barcelone) et 3 bâtiments (SFH30, SFH60 et SFH100) différents (voir la description détaillée de ces environnements dans le paragraphe 3.1.1). Chaque fois, les variables de ces simulations sont imposées aux bornes des modèles à comparer.

Le but ici n'est pas de valider les « sous-modèles » de la partie « Boîte Blanche », à proprement parler, mais d'estimer leurs potentiels et leurs lacunes pour mieux prendre en compte leurs influences sur l'ensemble du modèle global.

En considérant la méthodologie expérimentale envisagée, les précisions exigées sont différentes selon les modèles :

- Les capteurs et les besoins de chauffage (émetteurs de chaleur et bâtiment), en tant qu'éléments de l'environnement virtuel, seront simulés pendant l'application de la séquence d'entraînement. L'évaluation de l'état de ces éléments sera donnée comme information au SSC réel en test. Une bonne correspondance de ces modèles avec leurs équivalents de la Tâche 32 permettra de se rapprocher des données de référence usuelles pour une meilleure validation et comparaison des résultats.

- Le ballon de stockage et le système d'appoint seront présents physiquement pendant l'application de la séquence d'entraînement. L'état réel de ces éléments influencera le SSC en test. Une bonne précision de ces modèles garantira un entraînement plus fiable et plus efficace, avec des données proches de la réalité. Cependant, il n'est pas possible de vérifier la qualité d'estimation de ces modèles lors des tests car il n'est pas prévu de mesurer les températures et puissances concernées ici. En effet, la configuration appoint/stockage est propre à chaque système. Elle ne permet aucune mesure pour certains cas (appoint intégré au ballon par exemple) et nécessiterait une métrologie adaptée pour chaque test dans les autres cas. L'élaboration d'une méthodologie générale serait ainsi compromise. Les comparaisons faites dans cette partie avec les modèles de la Tâche 32 ne pourront que vérifier une bonne cohérence du modèle.

CHAPITRE 2

Les « modèles détaillés » de la Tâche 32 et les « modèles simplifiés » de chaque composant présentés ci-après, sont soumis aux mêmes données d'entrée et leurs sorties sont comparées. Il sera donc possible d'observer certains critères de performances, basés sur les différences entre la sortie du modèle de la Tâche 32, y_{T32} , et la sortie du modèle proposé dans cette thèse, $y_{BoiteBlanche}$, sur les n pas de temps de la simulation.

- Erreur absolue moyenne (Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{T32}(i) - y_{BoiteBlanche}(i)| \quad (2-18)$$

L'erreur absolue moyenne (MAE) mesure la précision du modèle, en considérant de manière linéaire l'erreur commise, sans prendre en compte la direction de l'erreur.

- Erreur type (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{T32}(i) - y_{BoiteBlanche}(i))^2} \quad (2-19)$$

L'erreur type ($RMSE$) est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne. Elle prend en compte le carré de l'erreur sur chaque pas de temps et est donc plus sensible aux grandes erreurs, même ponctuelles, que le critère MAE .

Les critères $RMSE$ et MAE peuvent être utilisés ensemble : plus $RMSE$ est grand par rapport à MAE , plus la variance de l'erreur est importante. Si $RMSE$ et MAE sont équivalents, toutes les erreurs sont du même ordre de grandeur.

- Coefficient de corrélation statistique (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{T32}(i) - y_{BoiteBlanche}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_{T32}(i) - \bar{y}_{T32})^2} \quad (2-20)$$

Le coefficient de corrélation statistique (R^2) est utilisé en régression linéaire pour quantifier la validité d'une estimation. Il mesure ici la qualité de l'estimation faite par le modèle simplifié. Plus R^2 est proche de 1, plus la relation $y_{T32} = y_{BoiteBlanche}$ est vérifiée.

- Erreur totale ($ErrTot$)

$$ErrTot = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{T32}(i) - y_{BoiteBlanche}(i))}{\sum_{i=1}^n (y_{T32}(i))} \quad (2-21)$$

L'erreur totale est surtout utile pour quantifier les différences de calcul des variables extensives (principalement les énergies) entre les modèles de référence (Tâche 32) et les sous-modèles de la « Boîte Blanche ». Elle mesure l'erreur d'estimation globale inhérente au modèle « Boîte Blanche ».

2.2.2.2. Modélisation des capteurs

- Présentation du modèle de base

Le modèle utilisé pour évaluer la température moyenne des capteurs est celui décrit dans [Perers, 1997]. Ce modèle est basé sur l'équation de « Hottel-Whillier-Bliss » pour les capteurs plans, adaptée pour caractériser quasiment tous les types de capteurs, excepté les auto-stockeurs (Integrated Collector Storage). Ce modèle est largement utilisé pour des simulations numériques [Perers et Bales, 2002], y compris pour le modèle de référence de la tâche 32, et pour la normalisation [EN 12975-2, 2006 ; ASHRAE 93-86, 1986].

Les capteurs sont assimilés dans ce modèle à un capteur unique de surface A_{coll} , égale à la somme de leur surface unitaire. L'équation dynamique (2-22) correspond au bilan d'énergie réalisé sur le nœud de température moyenne des capteurs. Elle est composée d'un terme d'inertie, d'un terme de prélèvement de flux de chaleur et des apports solaires nets (c'est-à-dire avec prise en compte de toutes les pertes), exprimés par l'équation (2-23).

$$c_5 \frac{dT_{coll}}{dt} = \dot{Q}_{sol,net} - \frac{\dot{Q}_{coll,out}}{A_{coll}} \quad (2-22)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sol,net} = F'(\tau\alpha)_{en} (K_{\theta_b}(\theta) \cdot G_{coll,b} + K_{\theta_d} \cdot G_{coll,d}) - c_6 v G_{coll} \\ - c_1 (T_{coll} - T_a) - c_2 (T_{coll} - T_a)^2 - c_3 v (T_{coll} - T_a) + c_4 (E_L - \sigma T_a^4) \end{aligned} \quad (2-23)$$

L'ensemble des paramètres nécessaires à ce modèle sont issus de tests normatifs de capteur [ISO 9806-1] et [ISO 9806-3].

Le facteur d'angle d'incidence K_{θ_b} dépend de l'angle d'incidence θ des rayons du soleil sur le plan des capteurs. Pour la plupart des capteurs, il peut être exprimé selon l'équation (2-24).

$$K_{\theta_b}(\theta) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (2-24)$$

L'angle d'incidence est calculé selon la position du soleil (angle zénithal θ_s et azimut solaire γ_s par rapport au sud), l'inclinaison β et l'azimut par rapport au sud γ du plan des capteurs à l'aide de l'équation (2-25).

$$\cos \theta = \cos \theta_s \cos \beta + \sin \theta_s \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2-25)$$

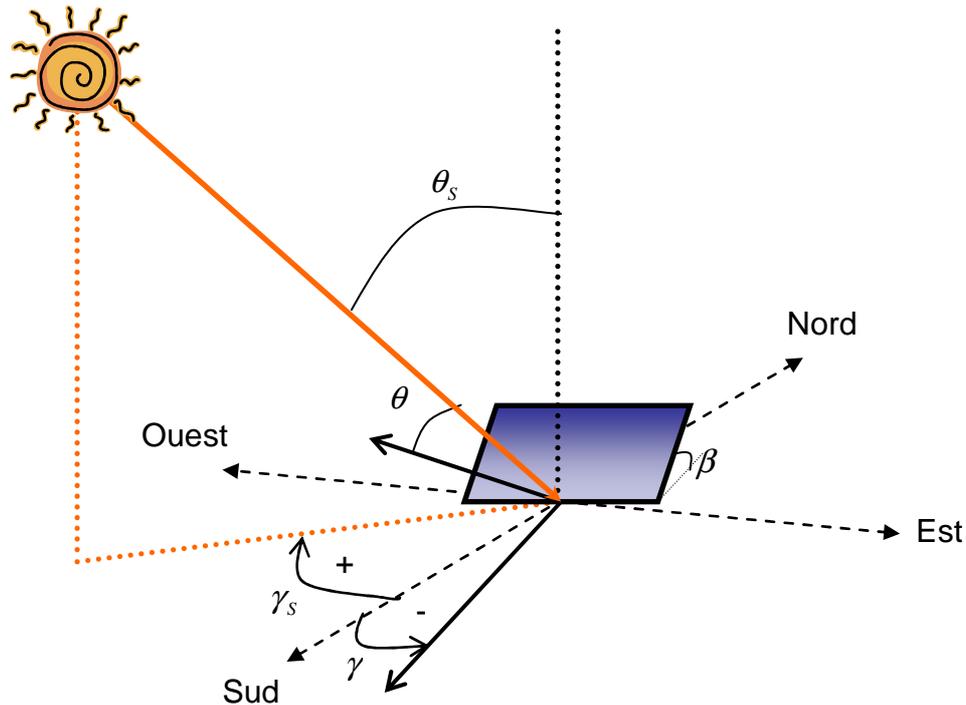


Figure 2-10 Schéma représentant les angles de position du soleil et du capteur

Certains types de capteurs (comme les Concentrateurs Paraboliques Composés et les capteurs sans vitrage à tubes séparés par exemple) ont un facteur d'angle d'incidence qui suit une loi différente, plus complexe. La solution dans ce cas est d'exprimer K_{θ_b} à l'aide d'une table, en fonction des composantes longitudinale et transversale de l'angle d'incidence.

- Présentation des hypothèses simplificatrices

La vitesse du vent v , présente dans l'équation (2-23), peut être facilement intégrée dans le vecteur des entrées. Elle a surtout de l'importance dans la modélisation de capteurs non vitrés. Jusqu'à présent, les tests n'ont pas fait intervenir ce type de capteur, inadapté pour les SSC. Par conséquent, dans un souci de simplification, la variable v ne figure pas dans les autres équations ou figures.

La principale difficulté pour retranscrire ce modèle dans la partie « Boîte Blanche » réside surtout dans le calcul des irradiances directes $G_{coll,b}$ et diffuses $G_{coll,d}$, sur le plan des capteurs. En effet, pour réduire le nombre d'entrée du modèle global de SSC, il a été choisi de ne garder uniquement que les irradiances sur le plan horizontal : G_b et G_d .

Le passage du plan horizontal au plan du capteur se fait très simplement par l'équation (2-26).

$$G_{coll,b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_s} G_b \quad (2-26)$$

Par contre, il existe beaucoup de modèles différents pour calculer l'irradiation diffuse venant du ciel sur un plan incliné. Les acteurs de la tâche 32 ont choisi le modèle de Perez [Perez et al., 1988]. Ce modèle complexe fait intervenir des variables non envisagées en entrées du modèle global (comme par exemple des facteurs de clarté et de brillance du ciel). Une simplification est ici nécessaire.

Un modèle simple de rayonnement diffus venant du ciel est le modèle isotropique mais qui n'est vraiment valable que par ciel couvert. Dans un cas de ciel très pur sans nuage, il est possible également de considérer que le rayonnement diffus vient principalement de la direction du soleil. Il semble en fait qu'un modèle compris entre ces deux extrêmes peut être raisonnablement considéré [Perrin de Brichambaut et Vauge, 1982]. En ce qui concerne le rayonnement diffus venant du sol, l'hypothèse usuelle consiste à considérer ce rayonnement isotropique. L'expression du rayonnement diffus total peut donc être exprimée par l'équation (2-27).

$$G_{coll,d} = \frac{\cos^2 \frac{\beta}{2} + \cos \theta}{1 + \cos \theta_s} G_d + alb(G_b + G_d) \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2-27)$$

Cette simplification est la principale différence entre le modèle envisagé pour la partie « boîte blanche » et celui de la Tâche 32.

Les variables et paramètres du modèle de capteur retenue pour la partie « boîte blanche » sont représentés sur la Figure 2-11.

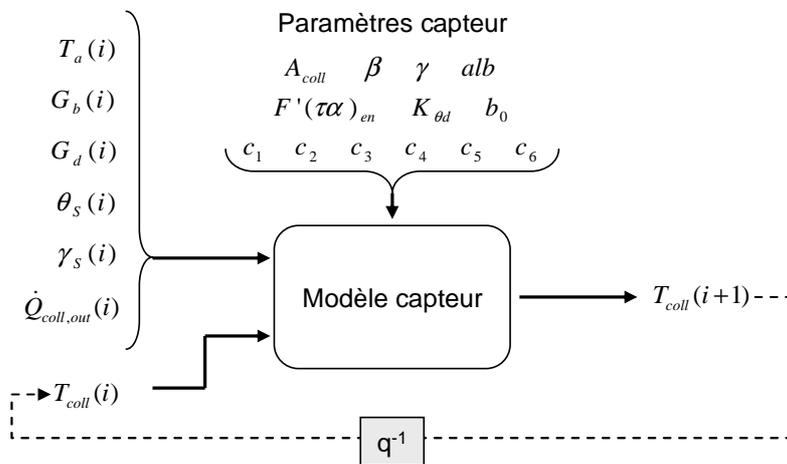


Figure 2-11 Schéma représentant les entrées, sorties et paramètres nécessaires au modèle capteur de la partie "boîte blanche" (en discrétisation explicite)

- Comparaison avec le modèle de la Tâche 32

La sortie principale du modèle étant une température, les critères pertinents à observer sont MAE , $RMSE$ et R^2 pour les 9 simulations annuelles citées dans le paragraphe 2.2.2.1.

CHAPITRE 2

Climat	Barcelone			Zurich			Stockholm		
Bâtiment	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
MAE [K]	0.5020	0.4997	0.4987	0.6968	0.6980	0.7100	0.5581	0.5533	0.5697
RMSE [K]	1.3387	1.3350	1.3305	1.7045	1.7038	1.7183	1.4013	1.3922	1.4237
R ² [-]	0.9981	0.9981	0.9981	0.9957	0.9955	0.9953	0.9974	0.9973	0.9972

Tableau 2-2 Comparaison entre le modèle de capteur de la tâche 32 et le modèle de capteur de la partie "boîte blanche" pour 9 simulations annuelles différentes

Les modèles sont très proches. La différence moyenne de température sur chaque pas de temps va globalement de 0,5 à 0,7 K. Les coefficients de corrélations sont très proche de 1 ce qui traduit une bonne cohérence entre les modèles tout au long des simulations.

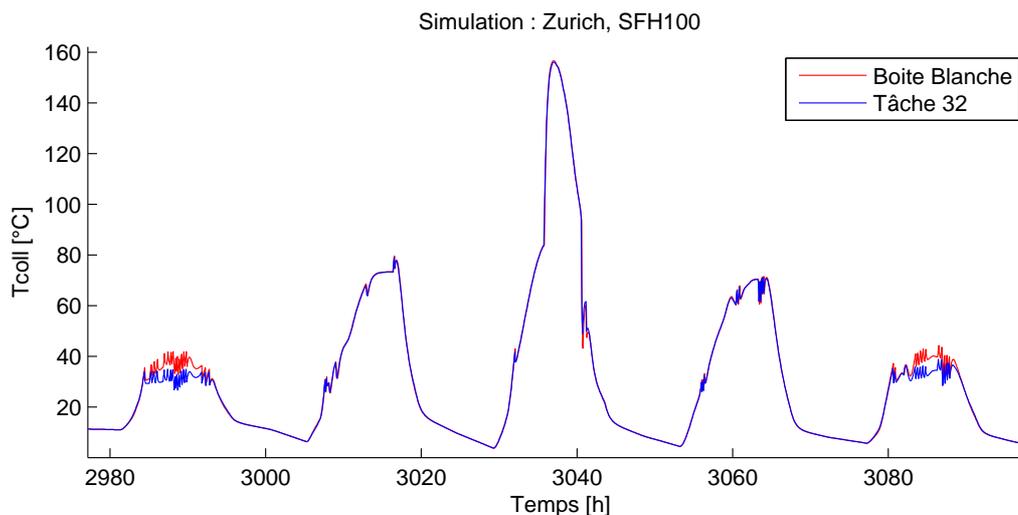


Figure 2-12 Exemple d'évolution de la température de capteur de chaque modèle

L'erreur type n'est pas très élevée non plus mais peut être 3 fois plus élevée que l'erreur moyenne : certaines différences sont plus importantes que d'autres. En effet les différences sont plus conséquentes pour une plage de températures intermédiaires, comme le montre sur la Figure 2-13.

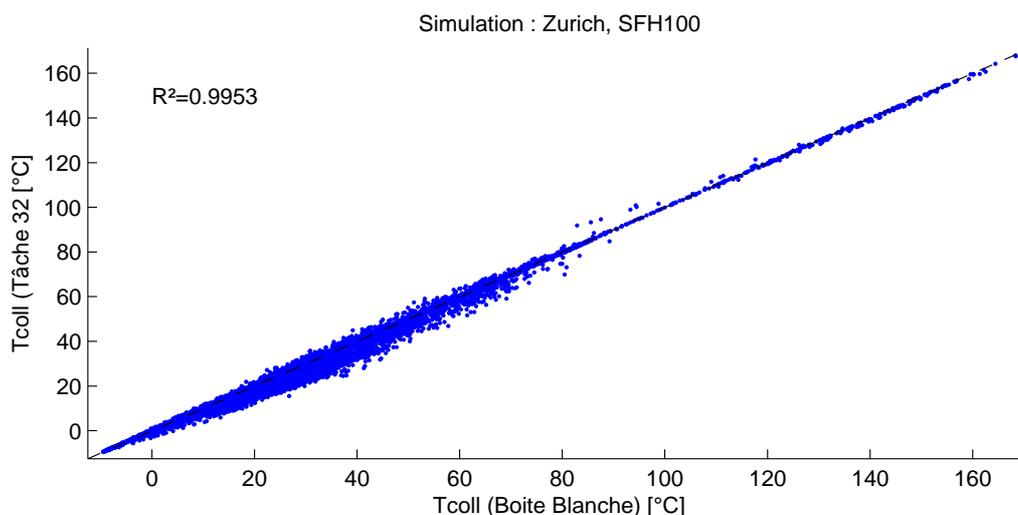


Figure 2-13 Comparaison des températures de capteur tout au long de la simulation annuelle

Ceci vient principalement des modèles de rayonnement diffus. Celui choisi dans la partie « boîte blanche » semble surestimer le rayonnement lors de journées

nuageuses, ce qui se traduit par une température de capteur plus importante, comme lors de la 5^e journée représentée sur la Figure 2-12.

Même avec cette différence, les modèles sont très semblables ce qui garantit une information correcte sur l'énergie disponible au niveau des capteurs pour le modèle global, ainsi que des résultats comparables à ce niveau avec ceux de la Tâche 32.

2.2.2.3. Modélisation des besoins de chauffage (émetteurs et bâtiment)

- Présentation des modèles

La modélisation des besoins de chauffage se fait grâce à un couplage entre un modèle d'émetteur de chaleur et un modèle de bâtiment.

Dans le but de se rapprocher d'un test normatif, le modèle de bâtiment choisi pour l'instant est un modèle de type nodal défini par la norme internationale ISO 13790 :2008(E) [ISO13790, 2008]. Le schéma électrique équivalent, en termes de résistances et capacités (schéma R-C) est représenté sur la Figure 2-14.

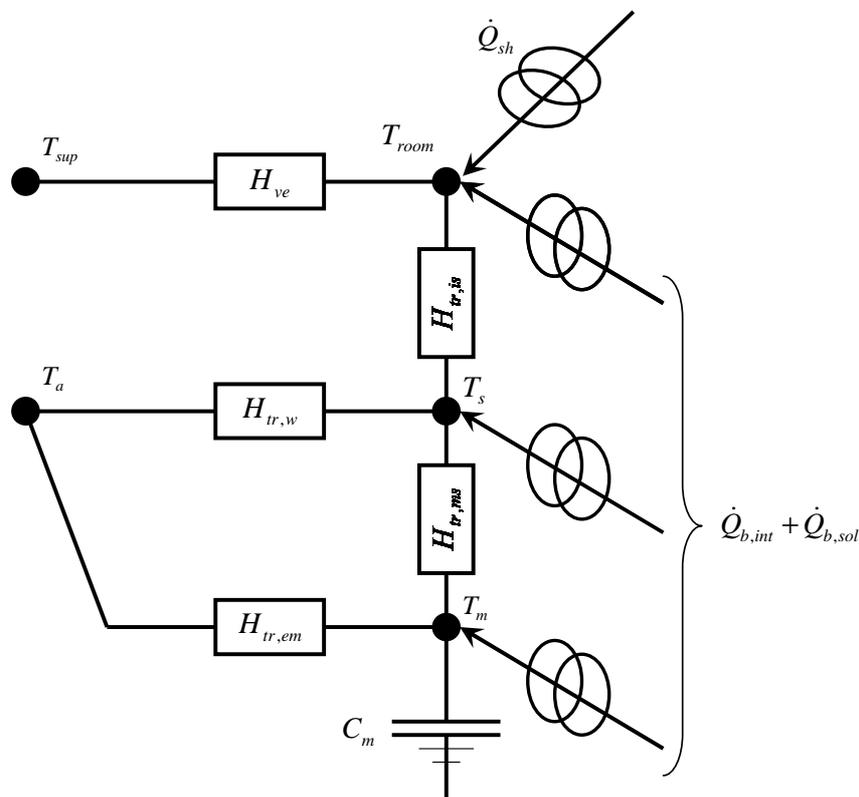


Figure 2-14 Schéma électrique équivalent du modèle de bâtiment selon la norme ISO 13790

On distingue dans ce modèle nodal :

→ les transferts par renouvellement d'air entre la température d'air intérieure T_{room} et la température d'entrée de l'air T_{sup} , via la conductance H_{ve} définie par l'équation (2-28). Dans cette expression, très couramment utilisée, le débit de renouvellement q_v est exprimé en $m^3 \cdot h^{-1}$.

$$H_{ve} = 0,34.q_v \quad (2-28)$$

→ les transferts conductifs à travers les parois de l'enveloppe du bâtiment. Ces transferts sont partagés en deux composantes :

→ transferts dans les éléments considérés comme purement résistifs (ou sans inertie telles que les parois vitrées) entre la température T_s et la température d'air extérieur T_a , via la conductance $H_{tr,w}$;

→ transferts dans les éléments résistifs/capacitifs (ou dotés d'inertie) entre leur température de surface T_m et la température d'air extérieur T_a via la conductance $H_{tr,em}$.

Les échanges superficiels par conduction et rayonnement de grandes longueurs d'onde se développant à l'intérieur du bâtiment peuvent être traduits par trois conductances formant un triangle entre les nœuds à T_{room} , T_m et T_w (température superficielle moyenne des éléments sans inertie). A la suite d'une décomposition « triangle-étoile », on fait apparaître un nœud « star » à la température T_s qui peut être interprétée comme une température résultante sèche. Cette dernière, qui est une moyenne pondérée entre la température d'air et la température radiante moyenne (moyenne des températures superficielles des parois pondérées par leur surface), est assez représentative de la température ressentie par les usagers.

Les conductances $H_{tr,w}$, $H_{tr,em}$, $H_{tr,ms}$ et $H_{tr,is}$ sont calculées à partir des paramètres physiques et architecturaux de l'enveloppe de bâtiment. Ces calculs prennent en compte la décomposition « triangle-étoile » signalée précédemment.

La capacité C_m est donnée par l'équation (2-29), avec κ_j la capacité thermique interne en $J.m^2.K^{-1}$ de l'élément d'enveloppe j d'aire A_j , en contact direct avec l'ambiance extérieure.

$$C_m = \sum_j \kappa_j . A_j \quad (2-29)$$

Elle est calculée à partir des matrices de transfert harmoniques des parois pour une période journalière, conformément à la norme ISO13786 :2007 [ISO13786, 2007]. La surface équivalente des parois qui participent à cette inertie séquentielle est donnée par l'équation (2-33). Cette expression permet de prendre en compte le fait qu'un ensemble de parois à caractéristiques internes de stockage homogènes est plus efficace qu'un ensemble hétérogène où les temps de réponse seraient tous différents.

$$A_m = \frac{C_m}{\sum_j \kappa_j^2 . A_j} \quad (2-30)$$

Un bilan thermique sur chaque nœud donne les équations (2-31).

$$\begin{aligned}
 C_m \frac{dT_m}{dt} &= (H_{tr,em} (T_a - T_m) + H_{tr,ms} (T_s - T_m) + \dot{Q}_m) \\
 H_{tr,ms} (T_s - T_m) + H_{tr,w} (T_s - T_a) + H_{tr,is} (T_s - T_{room}) &= \dot{Q}_{st} \\
 H_{ve} (T_{room} - T_{sup}) + H_{tr,is} (T_{room} - T_s) &= \dot{Q}_{ia} + \dot{Q}_{sh}
 \end{aligned} \tag{2-31}$$

Les gains solaires passifs $\dot{Q}_{b,sol}$ et les gains de chaleur internes $\dot{Q}_{b,int}$, sont repartis sur différents nœuds de températures (T_{room} , T_s , T_m). Les premiers sont purement radiatifs et sont appliqués sur les nœuds T_m et T_s , alors que les seconds correspondent pour moitié à une part convective appliquée au nœud T_{room} , l'autre moitié radiative étant appliquée sur les 2 nœuds précédents. A l'aide de la surface de la masse thermique A_m et de la surface interne totale A_{tot} , les équations (2-32) expriment leur répartition.

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{ia} &= 0.5\dot{Q}_{b,int} \\
 \dot{Q}_m &= \frac{A_m}{A_{tot}} (0.5\dot{Q}_{b,int} + \dot{Q}_{b,sol}) \\
 \dot{Q}_{st} &= \left(1 - \frac{A_m}{A_{tot}} - \frac{H_{tr,w}}{9.1A_{tot}} \right) (0.5\dot{Q}_{b,int} + \dot{Q}_{b,sol})
 \end{aligned} \tag{2-32}$$

Le calcul des apports solaires passifs $\dot{Q}_{b,sol}$ nécessite de connaître le rayonnement solaire sur chaque surface considérée dans le modèle de bâtiment. Ces variables sont obtenues à partir des données d'irradiation sur une surface horizontale à l'aide du modèle de rayonnement déjà décrit dans la partie 2.2.2.2 (voir les équations (2-26) et (2-27)).

Pour répondre aux besoins de chauffage de ce bâtiment (flux \dot{Q}_{sh}), la chaleur fournie par le SSC est transférée via des émetteurs de chaleur. Jusqu'à présent, les études de ce projet n'ont porté que sur des émetteurs du type radiateur à eau chaude. Pour adapter la partie « Boîte blanche » aux planchers chauffants, il suffirait de déterminer un modèle numérique adéquat de ce type d'émetteur et de le coupler correctement au bâtiment.

Le modèle de radiateur utilisé ici pour évaluer la puissance émise et la température moyenne des émetteurs est basé sur les paramètres standards K et n , calculés dans la norme européenne EN 442-2 [EN442-2, 1996]. Ils caractérisent les échanges convectifs et radiatifs de chaleur entre la température moyenne des radiateurs et la température de l'air intérieur.

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{sh} &= (UA)_{em} (T_{em} - T_{room}) \\
 (UA)_{em} &= K (T_{em} - T_{room})^{n-1}
 \end{aligned} \tag{2-33}$$

CHAPITRE 2

L'utilisation du terme de conductance thermique $(UA)_{em}$ tel qu'exprimé dans (2-33) permet de s'affranchir du problème de calcul lorsque T_{room} est supérieure T_{em} et que l'exposant n'est pas un entier.

La plupart du temps, les paramètres de dimensionnement d'un radiateur se basent sur une puissance nominale $\dot{Q}_{sh,nom}$, déterminée dans des conditions nominales ΔT_{nom} précisées. Selon le climat et le type de bâtiment, la puissance nominale du radiateur sera différente. Ainsi, le coefficient d'échange peut être exprimé par l'équation (2-34).

$$K = \frac{\dot{Q}_{sh,nom}}{\Delta T_{nom}^n} \quad (2-34)$$

Un terme d'inertie est ajouté pour rendre le modèle dynamique (comme les modèles usuels de simulation). La capacité du radiateur C_{em} peut être simplement calculée à partir de sa masse, du type de matériau et de sa contenance en eau.

$$C_{em} \frac{dT_{em}}{dt} = \dot{Q}_{em} - \dot{Q}_{sh} \quad (2-35)$$

Les deux modèles sont couplés via les températures d'émetteur et d'air intérieur. Cette dernière n'étant pas liée à une capacité thermique, la résolution numérique des équations présente une petite difficulté puisque T_{room} doit être solution à la fois du modèle d'émetteur et du modèle de bâtiment à chaque pas de temps. La méthode de la sécante, employée ici, est une méthode itérative qui permet de rechercher le zéro d'une fonction, sans passer par sa fonction dérivée. La formule de récurrence générale est la suivante :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{x_n - x_{n-1}}{f(x_n) - f(x_{n-1})} f(x_n) \quad (2-36)$$

L'initialisation nécessite deux points x_0 et x_1 proches, si possible, de la solution recherchée.

Cette méthode est appliquée à la fonction suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} x = T_{room} \\ x_0 = T_m \\ x_1 = T_{room,set} \\ f(x) = x - \frac{\dot{Q}_{ia} + \dot{Q}_{sh}(x) + H_{tr,is} \cdot T_s(x) + H_{ve} \cdot T_{sup}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \end{array} \right. \quad (2-37)$$

Les deux valeurs initiales sont T_m , température des éléments inertiels du bâtiment, et $T_{room,set}$, consigne de température d'air intérieur, car T_{room} en est très probablement

proche lors des différentes simulations. L'itération se termine lorsque la fonction f est inférieure à $0,0001^{\circ}\text{C}$.

Les variables et paramètres nécessaires à la modélisation des besoins retenue pour la partie « boîte blanche » sont représentés sur la Figure 2-15.

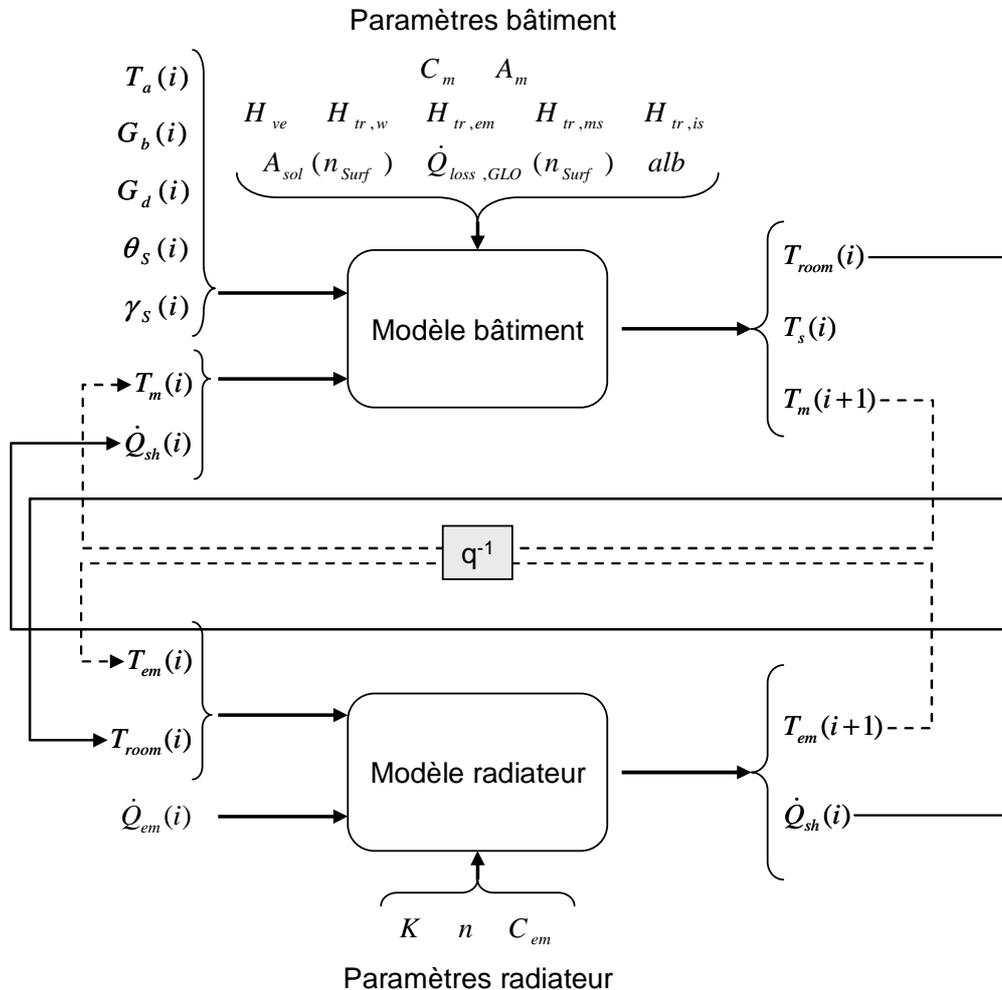


Figure 2-15 Schéma représentant les entrées, sorties et paramètres nécessaires à la modélisation des besoins de chauffage de la partie "boîte blanche" (en discrétisation explicite)

- Comparaison avec les modèles de la Tâche 32

Les « sous-modèles » sélectionnés ci-dessus remplissent les objectifs attendus, c'est-à-dire de n'utiliser que les variables présentées sur la Figure 2-8, et de correspondre à des paramètres et représentations standardisés. Pour vérifier leur cohérence par rapport à des calculs de référence, il est possible de comparer leurs résultats avec ceux obtenus par les modèles de bâtiment et de radiateurs utilisés lors de la Tâche 32.

Lors de la Tâche 32 de l'IEA, 3 bâtiments de qualités énergétiques différentes ont servi de références pour les simulations. Des modèles TRNSYS (Type 56) ont été programmés à partir de leur description architecturale et de leurs propriétés thermiques. Ces bâtiments, appelés SFH30, SFH60 et SFH100, sont décrits dans le

CHAPITRE 2

rapport technique [Heimrath et Haller, 2007]. Ils sont conçus de manière à ce qu'ils aient des besoins de chauffage respectifs de 30kWh.m^{-2} , 60kWh.m^{-2} et 100kWh.m^{-2} sur une année à Zurich.

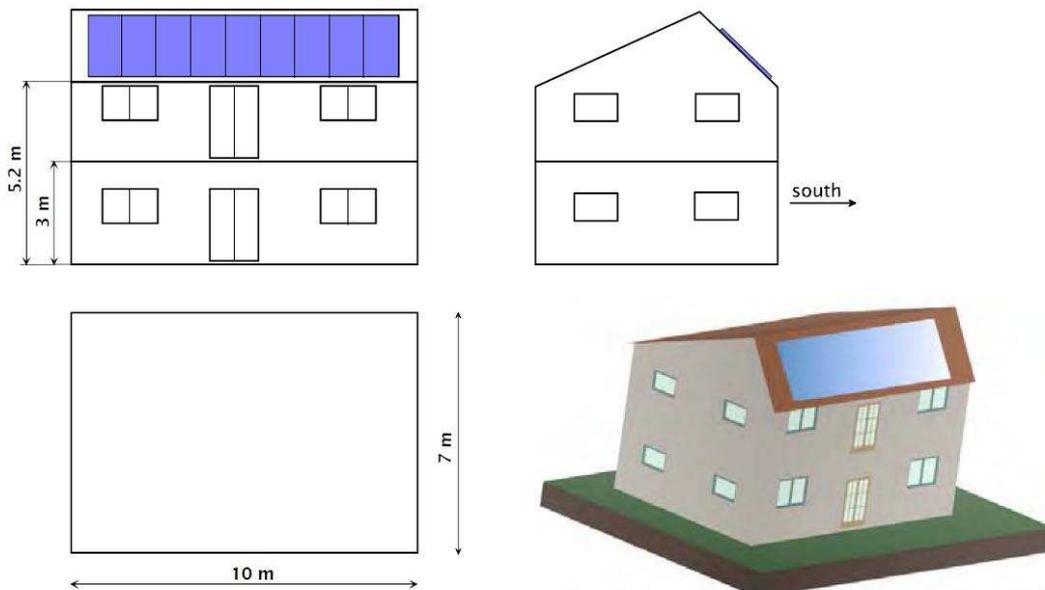


Figure 2-16 Croquis de l'architecture commune des bâtiments SFH modélisés lors de la Tâche 32 (Source : IEA SHC)

Le « Type 56 » de TRNSYS qui modélise les bâtiments est un outil très complexe. Les équations nécessitent un grand nombre de paramètres. Il serait difficile de les retranscrire pour pouvoir les utiliser dans un outil différent tel que le modèle bâtiment de l'ensemble « Boîte Blanche » présenté ci-dessus. De plus, cet outil n'est pas reconnu comme standard d'un point de vue normalisation et reste une propriété commerciale, limitant de fait ses applications potentielles. Néanmoins, il est très largement utilisé dans le domaine de la thermique du bâtiment et fait office de référence (il a notamment été utilisé pour l'élaboration de la méthode de validation des logiciels de simulation thermique de bâtiment BESTEST et de ses mises à jour lors des Tâches 12 [Bryn et Schiefloe, 1996], 22 [Neymark et Judkoff, 2004] et 34 [Neymark et Judkoff, 2008] de l'IEA).

Les bâtiments de la Tâche 32 sont également équipés de protections « anti-surchauffe » de l'air intérieur en période estivale : stores vénitiens, casquette sur les fenêtres sud et ventilation nocturne. Si le premier dispositif peut être programmé assez aisément, les deux derniers nécessitent des calculs complexes et des variables non considérés dans le modèle global de SSC.

Les émetteurs de chaleur utilisés dans ces bâtiments sont du type radiateur à eau chaude. Ils sont modélisés par [Holst, 1996], dans le « Type 362 » sous TRNSYS. Comme dans le modèle présenté par les équations (2-33), (2-34) et (2-35), il est dynamique du premier ordre, relié au modèle de bâtiment par des apports de chaleur à la fois convectifs et radiatifs. L'ensemble des échanges thermiques et la capacité des radiateurs sont supposés liés à la température moyenne en sortie des émetteurs de la manière suivante :

$$\dot{m}_{em} \cdot c_p \cdot (T_{em,in} - T_{em,out}) = C_{em} \cdot \frac{dT_{em,out}}{dt} + (UA)_{em} \cdot (T_{em,out} - T_{room}) \quad (2-38)$$

La principale différence avec le modèle proposé dans la partie « boîte blanche » concerne le calcul de la conductance thermique du radiateur. Son expression diffère selon le mode d'opération (trois au total). En fonctionnement normal, ce coefficient est défini de la manière suivante :

$$(UA)_{em} = \frac{\dot{Q}_{sh,nom} \left(\frac{\Delta T_{log}}{\Delta T_{log,nom}} \right)^n}{(T_{em,out} - T_{room})} \quad (2-39)$$

Le calcul de l'échange thermique est donc basé sur une différence de température logarithmique, définie dans l'équation (2-40).

$$\Delta T_{log} = \frac{T_{em,in} - T_{em,out}}{\ln \left(\frac{T_{em,in} - T_{room}}{T_{em,out} - T_{room}} \right)} \quad (2-40)$$

Ce coefficient d'échange est donc calculé à partir des températures d'entrée et de sortie de l'émetteur. Or celles-ci ne sont pas disponibles au sein du modèle complet de SSC envisagé. La différence logarithmique n'est donc pas utilisable dans la partie « Boîte Blanche » comme le montre les formules (2-33) et (2-34).

Pour évaluer l'influence de ces différences de calcul, les paramètres des modèles de 3 bâtiments SFH30, 60 et 100 sont calculés selon la norme ISO 13790 :2008(E) (voir ANNEXE A), pour les intégrer dans la partie « Boîte Blanche ». Les puissances et conditions nominales, ainsi que les exposants des radiateurs changent selon les simulations (pour s'adapter aux besoins) mais restent les mêmes quel que soit le type de modèle.

Avant de comparer la dynamique des « sous-modèles » de la partie « Boîte Blanche » avec celle des modèles utilisés dans le cadre de la Tâche 32, une première vérification est faite sur le calcul des besoins de chauffage. Les simulations annuelles sont réalisées plusieurs fois de manière à ce que le SSC de référence soit soumis à la modélisation « simplifiée » des besoins (cf. « Boîte Blanche »), au modèle de la Tâche 32 (Type 56) et une dernière fois, à ce même modèle mais privé de protections « anti-surchauffe ».

CHAPITRE 2

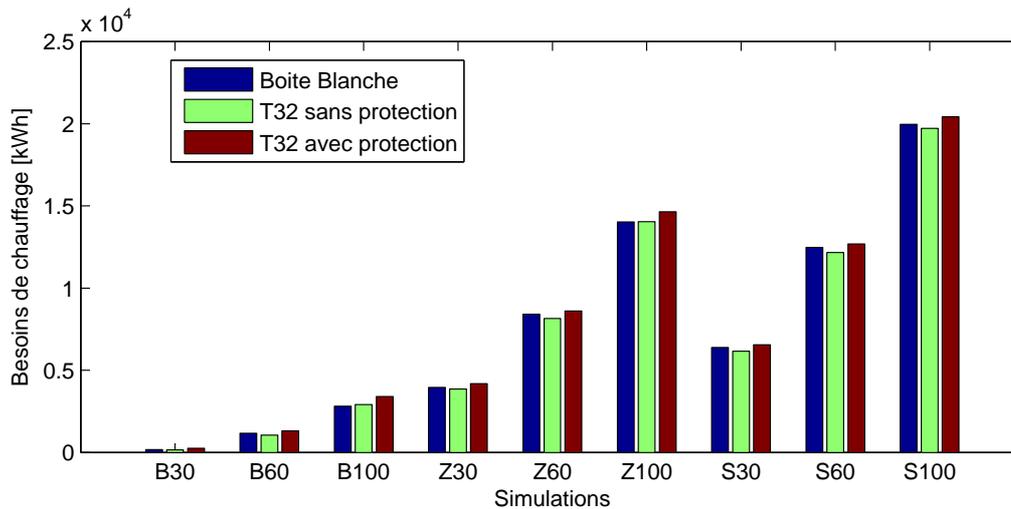


Figure 2-17 Comparaison des besoins de chauffage des différents modèles pour les 9 simulations annuelles

Climat	Barcelone			Zurich			Stockholm		
Bâtiment	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
Avec protection [%]	33,82	11,07	16,86	5,40	2,37	4,15	2,34	1,70	2,25
Sans protection [%]	-9,45	-10,32	2,90	-2,55	-3,10	0,03	-3,66	-2,56	-1,20

Tableau 2-3 Différences relatives entre les besoins du modèle "boîte blanche" et des deux versions du modèle de la Tâche 32 sur les 9 simulations annuelles

La Figure 2-17 et le Tableau 2-3 montrent que les besoins calculés sont semblables quel que soit le modèle. Les protections « anti-surchauffe » augmentent légèrement les besoins, du fait de l'inertie du bâtiment : moins d'énergie est emmagasinée en période estivale. Malgré cela, les différences restent faibles pour Zurich et Stockholm où elles ne dépassent pas les 5,4%. Les erreurs relatives pour le climat de Barcelone paraissent importantes mais ne concernent que de faibles quantités de besoins de chauffage. Pour ce climat, les bâtiments sont beaucoup plus soumis à des apports solaires passifs et les protections « anti-surchauffe » jouent alors un rôle important. Sans protections « anti-surchauffe », les différences se réduisent considérablement. Elles ne dépassent pas les 3,7%, sauf pour le climat de Barcelone où elles atteignent 10%.

Pour comparer la dynamique de ces modèles de manière pertinente, les protections « anti-surchauffe » sont désactivées. En effet, suivant les modèles utilisés, la température d'air intérieur en période estivale est très différente lorsque les protections sont activées, ce qui fausse la valeur des critères définis dans le paragraphe 2.2.2.1.

Climat	Barcelone			Zurich			Stockholm		
Bâtiment	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
MAE [K]	0,58	0,38	0,34	0,42	0,27	0,25	0,34	0,25	0,23
RMSE [K]	0,71	0,25	0,45	0,57	0,37	0,34	0,51	0,37	0,33
R ² [-]	0,9866	0,9907	0,9909	0,9854	0,9880	0,9814	0,9870	0,9833	0,9713

Tableau 2-4 Comparaison entre la température d'air intérieur du modèle de la tâche 32 et la température d'air intérieur du modèle de la partie "boîte blanche" pour 9 simulations annuelles différentes (cas sans protections « anti-surchauffe »)

Le Tableau 2-4 montre que les deux modélisations de bâtiments ont des dynamiques semblables. Les différences moyennes sont faibles et les erreurs types sont du même ordre de grandeur. Les différences sont à peu près de la même importance tout au long des simulations. Le coefficient de régression est inférieur à 0,99 dans certains cas mais reste correct. Les différences sont assez bien équilibrées tout au long de la simulation (Figure 2-18).

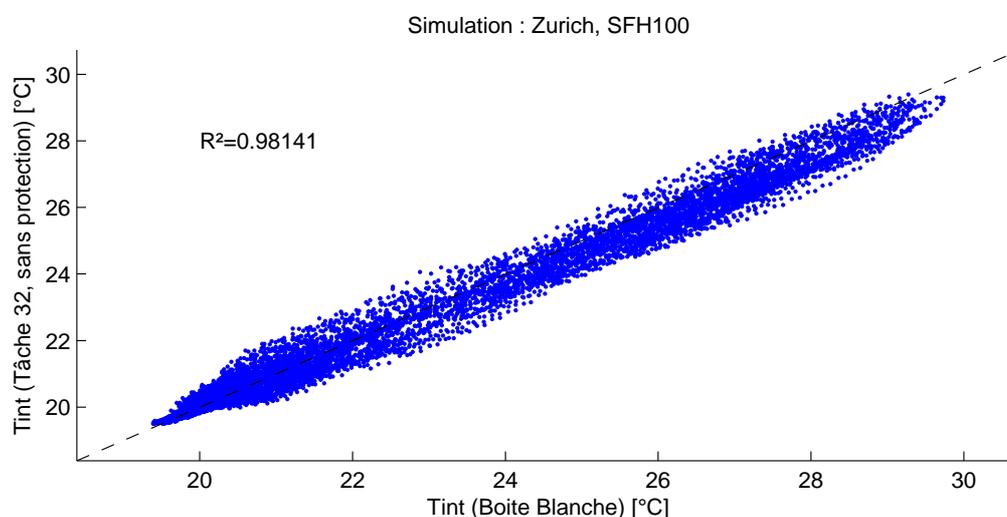


Figure 2-18 Comparaison des températures d'air intérieur tout au long de la simulation annuelle

La raison principale de ces différences vient surtout du fait que le modèle de bâtiment de la norme ISO13790 utilisé dans l'ensemble « Boîte Blanche », très simplifié, ne prend en compte qu'une seule capacité thermique (modèle dynamique du premier ordre). Or, on distingue différentes fréquences de variations dans la sortie du « Type 56 », résultant d'un ordre de modèle plus important. Ainsi, les deux modèles ne réagissent pas exactement de la même manière mais ont tout de même un comportement très semblable, comme le montre la Figure 2-19. Compte tenu des objectifs assignés à ce modèle simplifié de bâtiment, le « sous-modèle » de la partie « Boîte Blanche » est donc capable de fournir une information suffisamment riche sur la dynamique des besoins de chauffage en respectant les principales variations de températures de l'air intérieur.

CHAPITRE 2

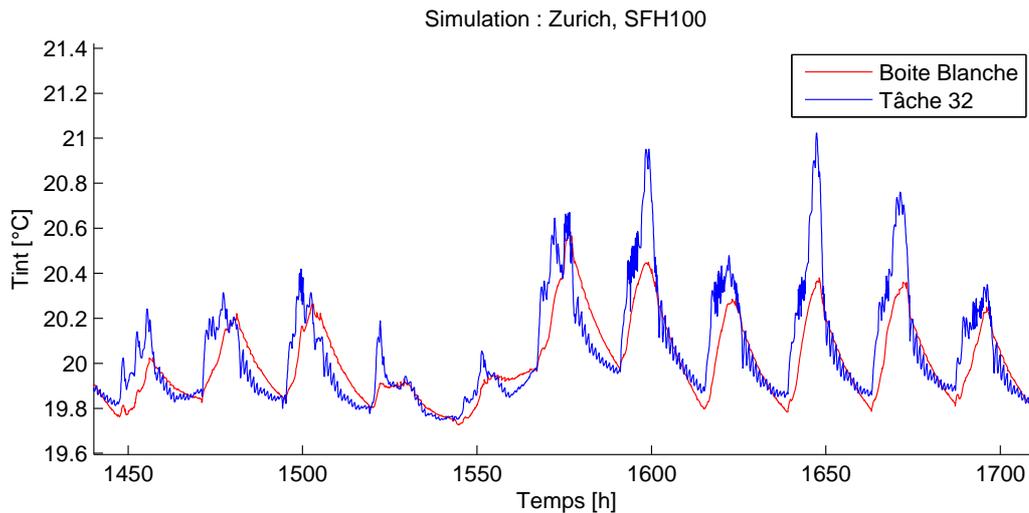


Figure 2-19 Exemple d'évolution de la température d'air intérieur de chaque modèle

Les résultats relatifs au comportement des bâtiments peuvent être considérés comme proches. Il sera donc possible d'utiliser lors des tests et de simulations, un modèle simple de bâtiment, référencé dans les normes européennes et proche de modèles de référence. En ce qui concerne les radiateurs, les résultats sont un peu plus contrastés, comme le montre le Tableau 2-5.

Climat	Barcelone			Zurich			Stockholm		
Bâtiment	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
MAE [K]	0,77	0,93	1,62	1,09	1,26	1,83	0,99	1,11	1,71
RMSE [K]	1,04	1,39	2,57	1,37	1,72	2,73	1,25	1,54	2,57
R ² [-]	0,9711	0,9262	0,7006	0,8844	0,7246	0,8369	0,8865	0,7756	0,8813

Tableau 2-5 Comparaison entre la température moyenne des émetteurs obtenue par le modèle de la tâche 32 et la température moyenne des émetteurs obtenue par le modèle de la partie "Boîte Blanche" pour 9 simulations annuelles différentes

Les différences entre MAE et RMSE pour la température moyenne des émetteurs sont plus importantes que dans le cas de la température d'air intérieur. Globalement, l'erreur moyenne sur chaque pas de temps va de 0,9 à 1,8K. Encore une fois, les deux critères sont proches. Les différences ont des importances semblables tout au long des simulations et ne sont pas dues à des phénomènes locaux. Le coefficient de corrélation statistique est faible pour l'ensemble des simulations.

Pourtant, comme le montre le Tableau 2-4, T_{int} n'est pas influencé pas ces différences. En fait, quel que soit le modèle, les radiateurs émettent globalement la même chaleur mais avec des températures de fonctionnement différentes. Les hypothèses concernant la différence de température à prendre en compte pour l'échange de chaleur (différence simple ou différence logarithmique) et le calcul du coefficient d'échange résultant, font que le modèle simplifié de radiateur fonctionne à plus haute température que le « Type 362 ». Ce phénomène est visible sur la Figure 2-20.

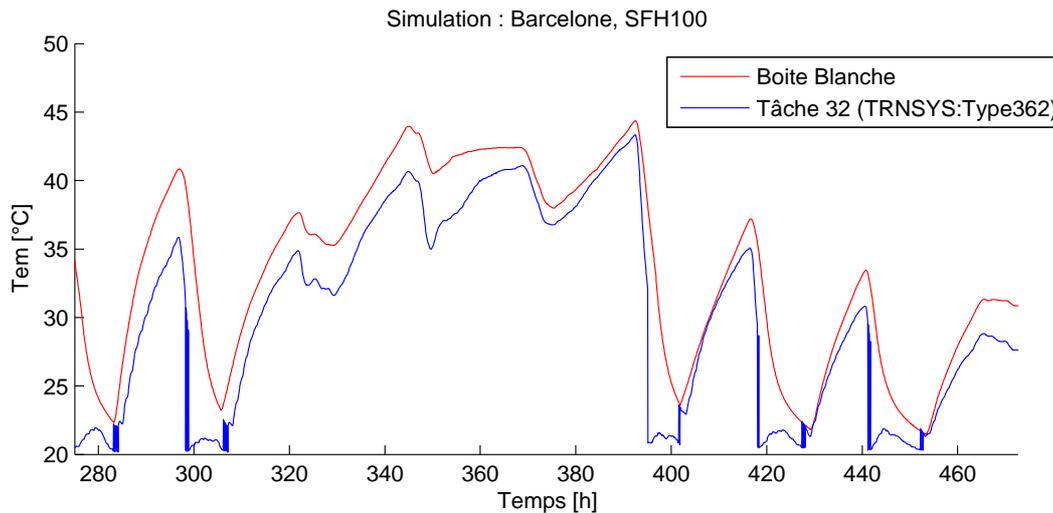


Figure 2-20 Exemple d'évolution de la température moyenne des émetteurs suivant le modèle utilisé

Finalement, la modélisation des besoins de chauffage proposée ici pour constituer la partie boîte blanche est très proche de celle définie lors de la Tâche 32. Dans les différentes configurations de simulations sélectionnées, les besoins de chauffage calculés à l'aide des deux approches sont similaires. D'un point de vue dynamique, les modèles de bâtiment sont semblables. Par contre, les radiateurs fonctionnent à température légèrement plus haute avec le modèle simplifié de la partie « boîte blanche ». Ceci peut avoir une influence sur les performances du SSC testé, en fonction de la stratégie d'émission de chaleur choisie. Cet aspect sera à prendre en compte lors de la comparaison d'estimations de performances avec les données de la tâche 32.

2.2.2.4. Modélisation du stockage et de l'appoint

- Présentation des modèles

Le stockage est un des éléments propres à chaque SSC. Contrairement aux autres éléments présentés ci-dessus, cette partie ne fait pas partie de l'environnement virtuel pendant la phase de test.

L'objectif de ce modèle est de donner une information sur la quantité d'énergie stockée dans le ballon. Etant donné qu'il y a très peu de variables disponibles aux bornes de la partie « boîte blanche » et que seuls les paramètres directement disponibles sans mesures complémentaires peuvent être utilisés, un modèle détaillé de stockage prenant en compte la qualité de l'énergie stockée (c'est-à-dire la qualité de la stratification de l'eau chaude) n'est pas possible. Le modèle se résume donc à un simple bilan énergétique, complété par une capacité thermique et un coefficient global de pertes (équation (2-41)).

$$C_{store} \frac{dT_{store}}{dt} = \dot{Q}_{aux,store} + \dot{Q}_{coll,store} - \dot{Q}_{em,store} - \dot{Q}_{dhw,store} - (UA)_{store} (T_{store} - T_{amb,store}) \quad (2-41)$$

Dans cette équation, les flux de chaleur arrivant au niveau du ballon correspondent aux flux de chaleur « sortant » de chaque élément, corrigés par une estimation des pertes au niveau des circuits. Seules des estimations grossières sur chaque tube sont possibles avec les variables disponibles. En considérant chaque circuit comme

ayant un tube « chaud » et un tube « froid », leurs pertes peuvent être estimées grâce à un coefficient de perte et à une température représentative.

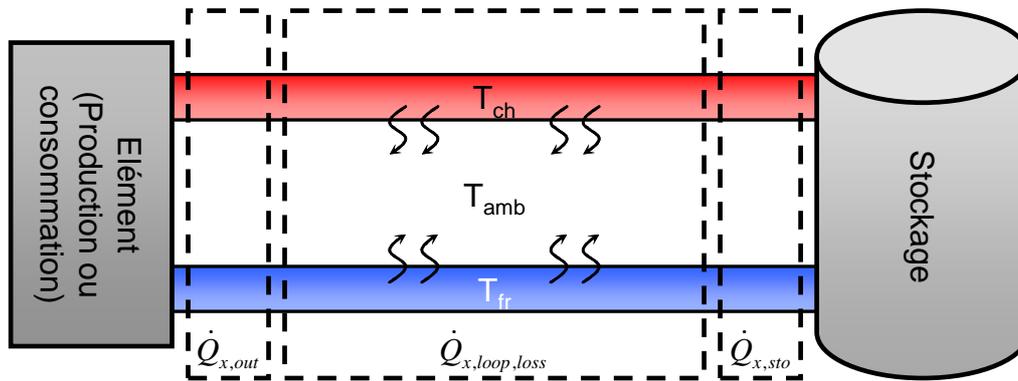


Figure 2-21 Schéma illustrant le principe de prise en compte des pertes thermiques au niveau de chaque circuit

Ainsi, pour estimer les pertes au sein de chaque circuit, il suffit de déterminer la conductance des tuyaux (à partir de leurs géométries et de leurs isolations) et d'identifier la température « chaude » et la température « froide » correspondantes pour chaque élément. Les températures actuellement retenues pour chaque élément sont résumées dans le Tableau 2-6.

Élément	Température « chaude »	Température « froide »
Appoint	$T_{aux,hot}$	$T_{aux,cold}$
Capteur	T_{coll}	T_{store}
Emetteur	T_{store}	T_{em}
Puisage ECS	$T_{set,dhw}$	T_{tap}

Tableau 2-6 Hypothèses retenues concernant les températures représentant les tuyaux de chaque circuit d'un SSC

Trouver des températures représentatives du circuit appoint (s'il y en a un) n'est pas évident sans aucune mesure. L'idée serait de se baser sur des valeurs normatives et de les adapter, en fonction du type d'appoint utilisé. Dans le cas d'une chaudière, les seules températures de fonctionnement connues et fiables sont celles imposées pour la détermination de la puissance nominale : d'après la norme [EN677, 1998], la température du fluide en retour de la chaudière doit être fixée à 60°C avec une différence maintenue à 20°C à ses bornes pendant la phase de test. En posant comme hypothèse qu'un changement de puissance n'affecte que la température de sortie (c'est dire en posant un débit de fonctionnement constant et une température de retour semblable à celle de l'essai normatif), la température « chaude » de l'appoint peut être très grossièrement évaluée par l'équation (2-42).

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{aux,out} &= x.\dot{Q}_{aux,nom} \\
 T_{aux,cold} &= T_{aux,cold,nom} \\
 T_{aux,hot} &= x.T_{aux,hot,nom} + (1-x).T_{aux,cold,nom}
 \end{aligned}
 \tag{ 2-42 }$$

Avec ces hypothèses et en considérant que les circuits sont soumis à la même température d'ambiance que le ballon de stockage, les équations des flux de chaleur aux bornes du ballon deviennent :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{aux,sto} = \dot{Q}_{aux,out} - (UA)_{aux,loop,hot} (T_{aux,hot} - T_{amb,store}) - (UA)_{aux,loop,cold} (T_{aux,cold} - T_{amb,sto}) \\ \dot{Q}_{coll,sto} = \dot{Q}_{coll,out} - (UA)_{coll,loop,hot} (T_{coll} - T_{amb,store}) - (UA)_{coll,loop,cold} (T_{store} - T_{amb,store}) \\ \dot{Q}_{em,sto} = \dot{Q}_{em} + (UA)_{em,loop,hot} (T_{store} - T_{amb,store}) + (UA)_{em,loop,cold} (T_{em} - T_{amb,store}) \\ \dot{Q}_{dhw,sto} = \dot{Q}_{dhw} + (UA)_{dhw,loop,hot} (T_{set,dhw} - T_{amb,store}) + (UA)_{dhw,loop,cold} (T_{tap} - T_{amb,store}) \end{cases} \quad (2-43)$$

Les pertes sont annulées lorsqu'il n'y a pas de chaleur transitant par le circuit.

Finalement, le modèle de ballon est très grossier. Cependant, il est important que la température de stockage soit suffisamment précise sur la séquence d'entraînement pour être certain que le modèle global de SSC apprenne le comportement du système testé selon une information d'énergie stockée correcte. Un modèle de SSC bien entraîné pourra gérer correctement l'évolution du stockage, aux erreurs de pertes des circuits près.

Le modèle de stockage utilise $Q_{aux,out}$, l'énergie fournie par le système d'appoint de chaleur. Or, la variable disponible aux bornes de la partie « boîte blanche » est $Q_{aux,out}$, l'énergie primaire consommée par le système auxiliaire. Par conséquent, une estimation du rendement de ce dernier est nécessaire.

Les SSC testés jusqu'à présent, réels (CHAPITRE 4) ou virtuels (CHAPITRE 3), intègrent comme appoint une chaudière gaz. Il est envisageable d'adapter cette partie du modèle à d'autres systèmes d'appoints tant qu'ils ne nécessitent pas de variables excessives, inaccessibles aux bornes du modèle global.

Dans un souci de rapprochement avec les textes réglementaires et normatifs, le modèle de générateur à combustion gaz employé dans la partie « boîte blanche » est celui décrit dans la Réglementation Thermique 2005 [RT2005, 2006]. Il évalue les pertes de la chaudière en fonction de la puissance qui lui est demandée grâce à un simple polynôme du second degré. La relation entre les puissances d'entrée et de sortie de la chaudière gaz peut ainsi être exprimée par l'équation (2-44).

$$\dot{Q}_{aux} = a_{aux} \dot{Q}_{aux,out}^2 + (1 + b_{aux}) \dot{Q}_{aux,out} + c_{aux} \quad (2-44)$$

Les coefficients a_{aux} , b_{aux} et c_{aux} sont calculés en fonction de puissances et de pertes caractéristiques du fonctionnement d'un générateur à combustion : (puissances nominale et intermédiaire, pertes à 100% de charge, à charge intermédiaire et à charge nulle). Ces caractéristiques sont elles-mêmes déterminées en fonctions de :

- [Type] : type de chaudière (standard, basse température, condensation) ;
- [Regul] : type de régulation du chauffage (constante, température intérieure, température extérieure)
- [Ventil] : présence ou non de dispositif de circulation d'air ou de produit de combustion dans le circuit de combustion ;

CHAPITRE 2

- [$T_{em,in,d}$ $T_{a,d}$ $T_{set,room}$]: températures représentant le dimensionnement du système de chauffage ;
- Autres paramètres disponibles dans la documentation technique des produits (des valeurs par défaut peuvent être prises dans le cas contraire).

Les calculs de ce modèle sont détaillés dans l'ANNEXE B.

$Q_{aux,out}$ est évalué en résolvant simplement l'équation quadratique. Quand une solution double est déterminée, la racine la plus proche de Q_{aux} est sélectionnée comme solution.

Pour adapter le modèle de chaudière de la RT2005 au modèle mis en place dans ce projet, certaines hypothèses sont nécessaires :

- Le modèle RT2005 est décrit comme un modèle horaire. Il faut donc considérer que celui-ci est également fiable pour des pas de temps inférieurs, adaptés au projet ;
- Deux modes de fonctionnement sont décrits dans la RT2005: un mode chauffage et un mode ECS. Ce dernier considère un ratio du pas de temps horaire où la chaudière fonctionne à pleine charge. Or, l'information des modes de fonctionnement de la chaudière n'est pas disponible au sein du modèle global de SSC. Le mode ECS de la chaudière, plus intermittent, n'y est donc pas pris en compte.

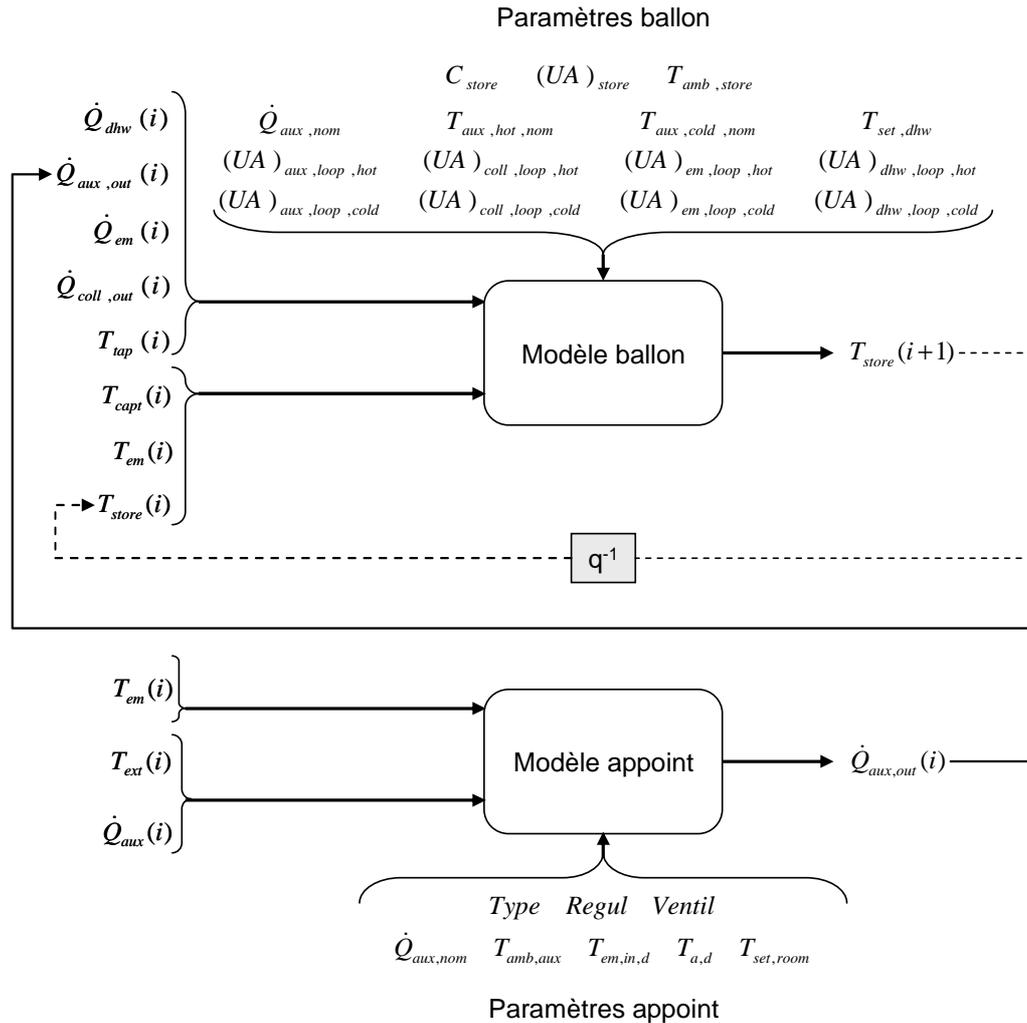


Figure 2-22 Schéma représentant les entrées, sorties et paramètres de la partie "Boîte Blanche" nécessaires à la modélisation du stockage de chaleur par ballon hydraulique et d'un appoint à combustion gaz (en discrétisation explicite)

- Comparaison avec les modèles de la Tâche 32

Le modèle de ballon utilisé comme référence par la tâche 32 de l'IEA est celui défini par [Drück, 2006]. Il est référencé comme étant le « Type 340 » sous TRNSYS. Le ballon est décomposé en plusieurs zones de températures. Le calcul des échanges thermiques entre chaque zone est détaillé. Les paramètres nécessaires pour utiliser ce modèle sont très nombreux : il faut au moins une vingtaine de paramètres dans la configuration minimale et la plupart d'entre eux ne sont pas disponibles sans procéder à des tests additionnels sur le ballon. Ce modèle est donc beaucoup plus détaillé que celui retenu pour la partie « boîte blanche ».

Le modèle d'appoint utilisé comme référence par la tâche 32 de l'IEA est celui d'une chaudière, développé par C. Beuer puis mis à jour par T. Fiedler et A. Knirsch [Fiedler et Knirsch, 1998]. Il est référencé comme étant le « Type 370 » sous TRNSYS. Ce modèle calcule de manière détaillée les puissances et températures de fonctionnement de différents types de chaudières (fuel, gaz, bois). Pour calculer l'énergie consommée, le modèle prend en compte les pertes de combustion, les

CHAPITRE 2

pertes thermiques et l'énergie récupérée par condensation. Il est complexe et nécessite de connaître un grand nombre de paramètres et d'entrées, dont certains ne sont pas disponibles directement.

Les comparaisons faites confrontent donc ici des modèles très simplifiés à des modèles détaillés.

En ce qui concerne le modèle d'appoint, les résultats semblent satisfaisants.

Climat	Barcelone			Zurich			Stockholm		
Bâtiment	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
MAE [kW]	0,01	0,02	0,04	0,07	0,12	0,14	0,11	0,16	0,17
RMSE [kW]	0,20	0,25	0,30	0,42	0,53	0,51	0,51	0,61	0,56
R ² [-]	0,9108	0,9534	0,9693	0,9647	0,9691	0,9803	0,9657	0,9704	0,9822
ErrTot [%]	-13,48	-5,3	-1,29	-2,39	-0,32	1,54	-1,00	0,37	1,87

Tableau 2-7 Comparaison entre la puissance fournie par l'appoint et calculée par le modèle de la tâche 32 et celle calculée par le modèle de la partie "Boîte Blanche" pour 9 simulations annuelles différentes

Les différences totales relatives sont faibles : elles dépassent rarement 2%, excepté pour le climat de Barcelone mais qui ne concerne que de très faibles valeurs d'énergie fournie par la chaudière d'appoint. D'un point de vue dynamique, les différences moyennes sur chaque pas de temps sont faibles également. *RMSE* étant beaucoup plus grand que *MAE*, les différences doivent être très localisées. En effet, comme le fonctionnement de la chaudière est assez saccadé, les différences principales se concentrent surtout sur les démarrages de la chaudière comme le montre la Figure 2-23.

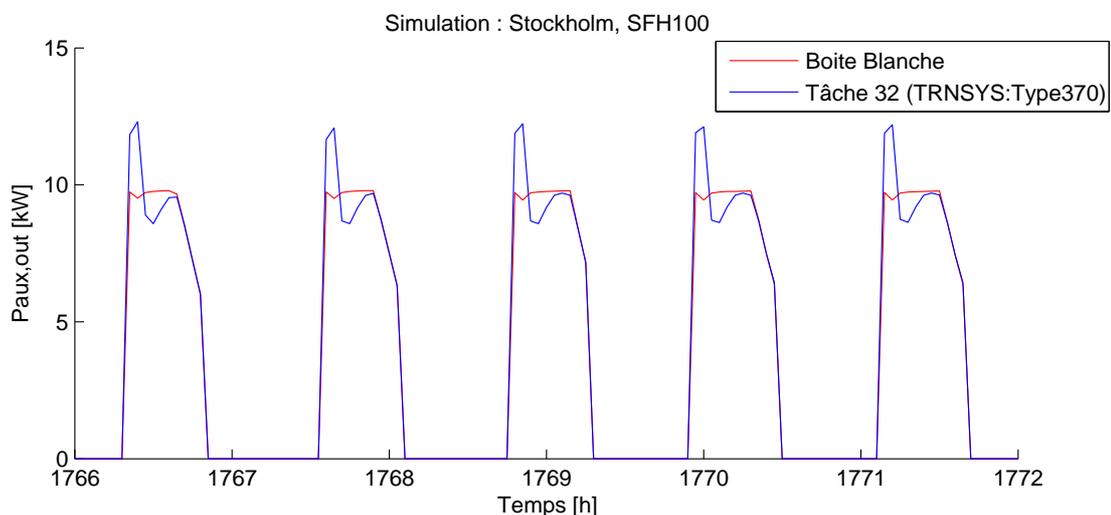


Figure 2-23 Exemple d'évolution de la puissance fournie par l'appoint suivant le modèle utilisé

Il semblerait que la « montée en puissance » de la chaudière selon le « Type 370 » ne soit pas prise en compte par le modèle de la RT2005. En effet, lorsqu'elle est sollicitée pour une forte charge, la chaudière selon le « type 370 » fournit d'abord, sur une courte période, une très forte puissance, même supérieure à sa puissance nominale alors que ce phénomène n'existe pas selon le « sous-modèle » de la partie « Boîte Blanche ».

Cette différence de comportement n'est réellement visible que sur les montées brusques en « pleine charge » de la chaudière. Or, le SSC de référence est un système du Type C2 selon Combisol (voir paragraphe 2.2.2.1), c'est-à-dire avec un appoint en chauffage connecté directement sur le ballon et sollicite de manière très régulière la chaudière, principalement à pleine charge, pour réchauffer la partie supérieure du stockage. Le phénomène en question est donc visible de manière récurrente tout au long des simulations de ce système. Ce ne sera pas forcément le cas selon le type de SSC à modéliser (voir les autres modèles de SSC utilisés pour l'expérimentation numérique dans les paragraphes 3.2.2 et 3.2.3).

Malgré ces observations, les modèles semblent globalement assez proches et ne présentent que de très faibles différences. Cependant, ces petites différences peuvent avoir des impacts plus importants sur le modèle de stockage hydraulique. Pour avoir un ordre de grandeur, considérons :

- une capacité thermique de 697Wh/K (correspondant à un ballon de 600L)
- une différence de puissance de 0,17kW (correspondant à la différence moyenne sur chaque pas de temps pour la simulation Stockholm/SFH100)
- un pas de temps de 3 minutes des simulations TRNSYS (comme précisé dans le paragraphe 2.2.2.1)

Cette configuration peut représenter une différence de température de 0,0122K à chaque itération entre les 2 modèles. Autrement dit, dans ces conditions, les modèles peuvent voir leurs estimations de température s'éloigner de 1K toutes les 4 heures (sans prise en compte des pertes et des autres apports de chaleur). La capacité thermique du stockage hydraulique est telle qu'une petite différence d'évaluation de la puissance fournie par l'appoint peut influencer grandement l'évolution de la température moyenne du stockage.

Ce phénomène est effectivement observé en comparant les modèles de stockage (voir Tableau 2-8).

Climat	Barcelone			Zurich			Stockholm		
	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
Bâtiment	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
MAE [K]	2,73	3,16	3,47	4,89	4,41	3,65	4,35	3,47	3,22
RMSE [K]	3,12	3,70	4,00	5,33	4,76	4,15	4,88	4,00	3,76
R ² [-]	0,9308	0,9180	0,9072	0,8917	0,9072	0,9085	0,9102	0,9315	0,9193

Tableau 2-8 Comparaison entre la température de stockage calculée par le modèle de la tâche 32 et celle calculée le modèle de la partie "boîte blanche", en gardant le modèle de chaudière « Type 370 » de TRNSYS dans les deux cas, pour 9 simulations annuelles différentes

En gardant les variables obtenues grâce au modèle détaillé de la chaudière (Type 370), le modèle simplifié de ballon donne des résultats corrects compte tenu des variables et paramètres nécessaires pour le mettre en place. Les différences sont globalement du même ordre de grandeur et sont généralisées sur la durée des simulations annuelles (*MAE* et *RMSE* du même ordre de grandeur). Une sorte de biais existe tout au long des simulations (voir la Figure 2-24), principalement due aux hypothèses sur les pertes de chaque circuit.

CHAPITRE 2

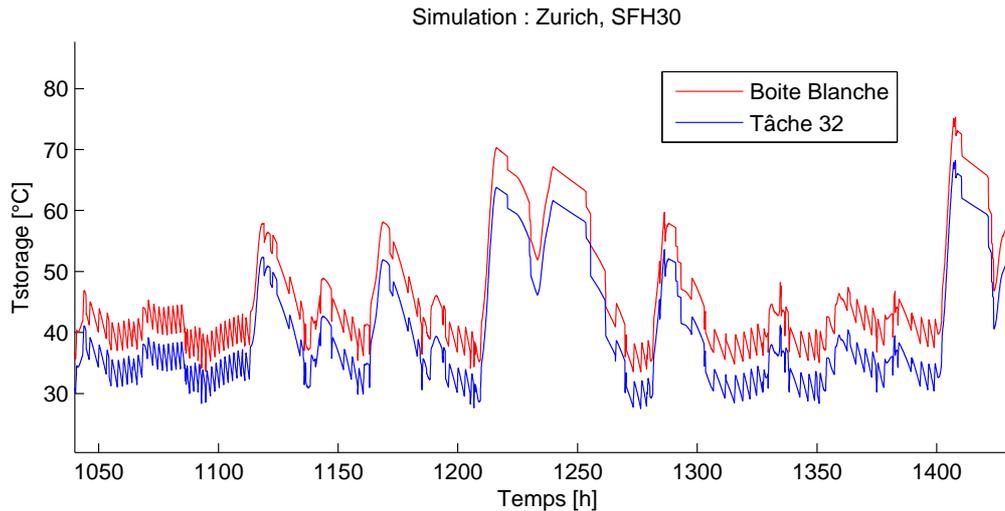


Figure 2-24 Exemple d'évolution de la température de stockage suivant le modèle (avec modèle d'appoint « Type 370 » de TRNSYS dans les deux cas)

Malgré ce biais, l'évolution de la température du stockage est bien retransmise. Ceci est important puisqu'elle traduit le comportement du système vis-à-vis de son stockage, que devra apprendre le modèle global de SSC. Un modèle bien entraîné avec une évolution correcte de la température du stockage devrait pouvoir gérer les erreurs commises sur les estimations des pertes de chaque circuit.

Par contre, les choses se compliquent en incorporant le modèle RT2005 de chaudière, comme le montre le Tableau 2-9.

Climat	Barcelone			Zurich			Stockholm		
Bâtiment	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100	SFH30	SFH60	SFH100
MAE [K]	4,34	5,24	5,45	8,43	6,27	9,79	6,71	6,44	13,41
RMSE [K]	5,71	6,83	6,85	9,75	7,70	12,54	8,49	7,68	18,77
R ² [-]	0,7713	0,7325	0,7498	0,6379	0,7576	0,1719	0,7279	0,7464	-0,9777

Tableau 2-9 Comparaison entre la température de stockage calculée par le modèle de la tâche 32 et celle calculée par le modèle de la partie "Boîte Blanche", avec modèle de chaudière RT2005 pour ce dernier, pour 9 simulations annuelles différentes

Comme expliqué ci-dessus, les petites différences d'estimation de puissance fournie par l'appoint entraînent, dans certains cas, d'importantes différences d'évolution de la température de stockage. Dans le cas de simulations de charges importantes (notamment la simulation Stockholm/SFH100), ces différences dénaturent complètement cette évolution, comme le montre la Figure 2-25.

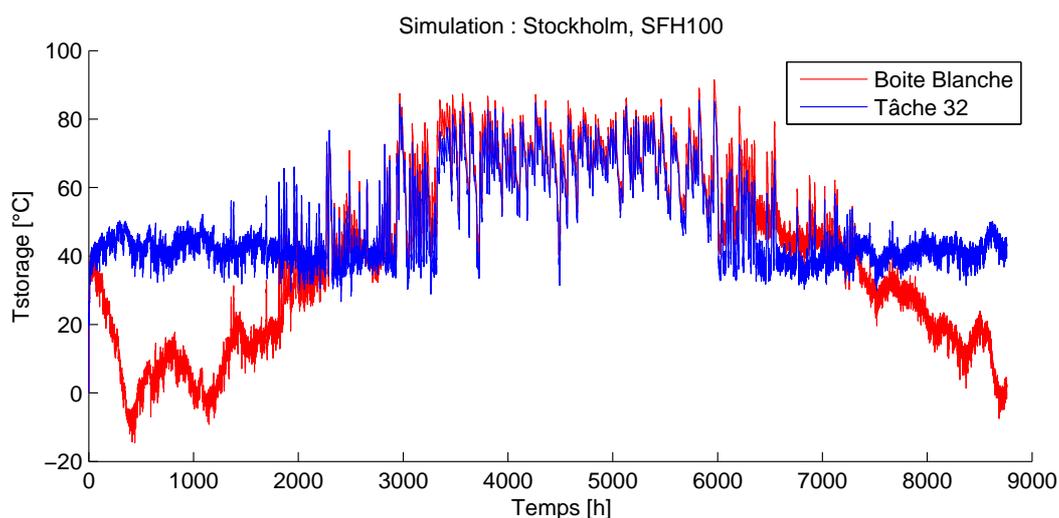


Figure 2-25 Exemple d'évolution de la température de stockage suivant le modèle (avec modèle d'appoint RT2005 pour la partie « Boîte Blanche »)

Une telle évolution ne peut évidemment pas convenir pour l'apprentissage d'un modèle neuronal. Elle fausserait sûrement toute référence de température pour l'assimilation des règles de régulation du SSC testé par le réseau de neurone. Il faut néanmoins souligner que la séquence d'entraînement envisagée (voir paragraphe 2.3.4.1) ne sera que d'une douzaine de jours et qu'ainsi, suivant les considérations prises ci-dessus concernant l'influence de l'estimation de la puissance fournie par la chaudière, la température moyenne du ballon de stockage ne risque pas d'être estimée avec de tels écarts comme présentés sur la Figure 2-25.

Il faudra cependant veiller à ce que l'évolution de la température de stockage soit correcte lors de la phase d'apprentissage, quitte à modifier légèrement, si besoin est, le paramétrage de la chaudière (on pourra jouer sur certains paramètres non définis précisément de la chaudière comme par exemple l'ensemble *Type*, *Régl* et *Ventil*). Il est plus important pour l'apprentissage d'un réseau que la température de stockage soit correcte plutôt que le paramétrage de la chaudière soit réel. Un modèle qui aura assimilé une évolution correcte de la température du stockage devrait pouvoir gérer correctement cette évolution pour d'autres simulations, avec le même paramétrage de la partie « Boîte Blanche ». Ainsi, les erreurs d'estimations d'énergie consommée par l'appoint ne différeront qu'aux légères différences de rendement près.

2.2.2.5. Bilan sur l'ensemble de la partie « boîte blanche »

Les modèles proposés pour constituer la partie « boîte blanche » ne nécessitent finalement que les paramètres présentés dans le Tableau 2-10.

CHAPITRE 2

Stockage	C_{store}	$(UA)_{store}$	$T_{amb,store}$		
	$\dot{Q}_{aux,nom}$	$T_{aux,hot,nom}$	$T_{aux,cold,nom}$	$T_{set,dhw}$	
	$(UA)_{aux,loop,hot}$	$(UA)_{coll,loop,hot}$	$(UA)_{em,loop,hot}$	$(UA)_{dhw,loop,hot}$	
	$(UA)_{aux,loop,cold}$	$(UA)_{coll,loop,cold}$	$(UA)_{em,loop,cold}$	$(UA)_{dhw,loop,cold}$	
Appoint	<i>Type Regul Ventil</i>				
	$\dot{Q}_{aux,nom}$	$T_{amb,aux}$	$T_{em,in,d}$	$T_{a,d}$	$T_{set,room}$
Capteur	β	γ	alb	$F'(\tau\alpha)_{en}$	$K_{\theta i}$
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Bâtiment	C_m	$H_{tr,w}$	h_{is}	$A_{sol}(n_{Surf})$	
	A_m	$H_{tr,op}$	h_{ms}	$P_{loss,GLO}(n_{Surf})$	
	A_f	H_{ve}	x_{at}	alb	
Radiateur	K	n	C_{em}		

Tableau 2-10 Tableau regroupant l'ensemble des paramètres nécessaires à la partie « Boîte Blanche »

Les paramètres du stockage et du système d'appoint sont à récupérer ou à mesurer à partir du système concret à tester. Les paramètres des capteurs peuvent être choisis selon les recommandations du fabricant ou à partir de documentations techniques de capteurs déjà testés. Des paramètres de bâtiments et radiateurs ont déjà été identifiés pour correspondre aux besoins de chauffage définis dans la Tâche 32 (voir ANNEXE A).

Utiliser le moins de variables et paramètres possibles coûte forcément en précision des modèles. Le choix des modèles présentés ci-dessus est un compromis qui semble intéressant compte tenu de la précision souhaitée pour l'estimation des états du système. Il faut vérifier si cette précision est suffisante pour l'apprentissage de modèle fiable de SSC.

L'étude ci-dessus montre les points robustes et les points faibles de cette partie « Boîte Blanche », en comparant les résultats obtenues avec ceux calculés à l'aide de modèles de références fréquemment utilisés. Ainsi, les modèles de capteur et de besoins de chauffage sont proches de ceux utilisés lors de la Tâche 32 de l'IEA. La modélisation du stockage et de l'appoint, éléments présents physiquement lors des tests, est un point délicat. L'utilisation de modèles très simplifiés, nécessaires pour la parcimonie et l'autonomie du modèle, rend difficile une estimation correcte de la température moyenne du stockage. On devra donc travailler ce point et vérifier l'évolution de la chaleur stockée en phase expérimentale, pendant la préparation de la séquence d'apprentissage.

Les modèles présentés ci-dessus ne concernent que les SSC utilisant des capteurs plans vitrés, un appoint à combustible, un stockage hydraulique et des émetteurs de chaleur de type radiateur à eau chaude. Ces éléments ont été abordés en premier lieu car ils étaient les plus représentatifs des systèmes disponibles lors de ce projet. Pour adapter cette partie « boîte blanche » à d'autres types de systèmes ou tout simplement améliorer la précision des modèles simplifiés, il est possible de remplacer ou d'ajouter d'autres modèles permettant d'évaluer l'état du système (qui

peut être plus complet), tant que ceux-ci ne nécessitent pas de variables supplémentaires et de paramètres non disponibles a priori.

2.2.3. La partie « Boîte Noire »

La partie « Boîte Noire » a pour objectif de modéliser le comportement propre d'un SSC testé, c'est-à-dire la manière dont sont gérés les différents flux d'énergie selon certaines variables extérieures et son propre état (les températures estimées par la partie « Boîte Blanche », voir le paragraphe 2.2.2). Cette partie représente vraiment la particularité de chaque système. Elle correspond donc à un modèle purement mathématique, à identifier complètement à partir d'une séquence d'essai sur un banc de test.

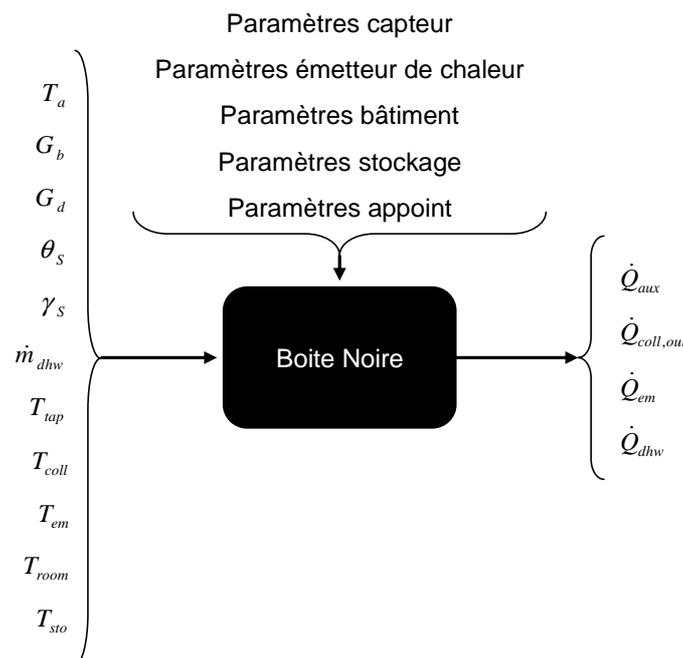


Figure 2-26 Schéma du principe du modèle "Boîte Noire"

Compte tenu du comportement général des SSC et des raisons évoquées dans le paragraphe 2.2.1, la partie « Boîte Noire » nécessite l'identification d'une application non-linéaire tel qu'un réseau de neurones. Pour faciliter l'apprentissage du modèle et la généralisation de ses résultats, il est possible de composer des vecteurs de régression utilisant certains paramètres propres au SSC et à son environnement.

2.2.3.1. Vecteurs de régression des entrées et sorties

De manière générale, pour l'apprentissage des réseaux de neurones, [Dreyfus et al., 2002] suggèrent de normaliser les entrées et les sorties du réseau. En effet, si par exemple, certaines entrées ont de très faibles valeurs absolues comparées à d'autres, elles n'auront pas vraiment d'effet sur l'entraînement. Idéalement, les variables doivent être centrées et réduites.

Une autre manière, proposée ici, permettant de compléter cette brute réduction de variables, est de combiner habilement entre elles, les variables et paramètres du système et de son environnement. De cette manière, les entrées et sorties du réseau de neurones ne sont pas directement les températures et flux de chaleur mais des

CHAPITRE 2

critères réduits de l'interaction entre le système, le bâtiment et le climat. L'utilisation de variables adimensionnelles pertinentes présente l'avantage de grouper les différentes situations énergétiques possibles en quelques valeurs caractéristiques, ce qui réduit le nombre d'investigation pour l'apprentissage complet du modèle « Boîte Grise ».

Les vecteurs de régression des entrées (φ) et sorties (y) du réseau proposés ici sont décrits par l'équation (2-45).

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \dot{Q}_{sol,net} / G_{ref} \\ \dot{Q}_{sh} / \dot{Q}_{sh,nom} \\ (T_{room} - T_{set,room}) / (T_{set,room} - T_{a,d}) \\ (T_{room} - T_a) / (T_{set,room} - T_{a,d}) \\ (T_{sto} - T_{set,dhw}) / 100 \\ G / G_{ref} \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} \dot{Q}_{aux} / \dot{Q}_{aux,nom} \\ \dot{Q}_{coll} / (A_{coll} G_{ref}) \\ \dot{Q}_{em} / \dot{Q}_{sh,nom} \end{bmatrix}$$

Les apports solaires nets sur le plan du capteur, $\dot{Q}_{sol,net}$ (définie par l'équation (2-23)), et \dot{Q}_{coll} , la chaleur fournie par les capteurs sont tous les deux divisés par une irradiance solaire de référence G_{ref} prise à $1000W.m^{-2}$. Un terme similaire mettant en jeu l'irradiance solaire totale sur une surface horizontale G est ajouté au vecteur de régression des entrées dans l'idée que celui-ci fournisse une information complémentaire au réseaux de neurones sur les besoins de chauffage du bâtiment, notamment lors d'apports solaires passifs importants.

La puissance reçue par les émetteurs, \dot{Q}_{em} , et la chaleur transférée par ces derniers vers l'air intérieur, \dot{Q}_{sh} , sont divisées par la puissance nominale du radiateur, $\dot{Q}_{sh,nom}$ (définie par l'équation (2-33)). Celle-ci est définie pour chaque simulation selon le climat et le type de bâtiment.

La température d'air intérieur, T_{room} , est comparée à sa consigne, $T_{set,room}$, et à la température extérieure, T_a . Ces deux comparaisons sont divisées par une différence de température de référence qui prend en compte la température de consigne d'air intérieur et la température extérieure de base, $T_{a,d}$, en fonction du climat.

\dot{Q}_{aux} est simplement divisée par la puissance nominale du système d'appoint, $\dot{Q}_{aux,nom}$.

Puisqu'il n'y a pas de température de référence évidente en relation avec la température moyenne du stockage, T_{sto} est comparée avec la température de consigne en ECS et est divisée par 100K, la différence entre la température d'ébullition et de fusion de l'eau à pression atmosphérique.

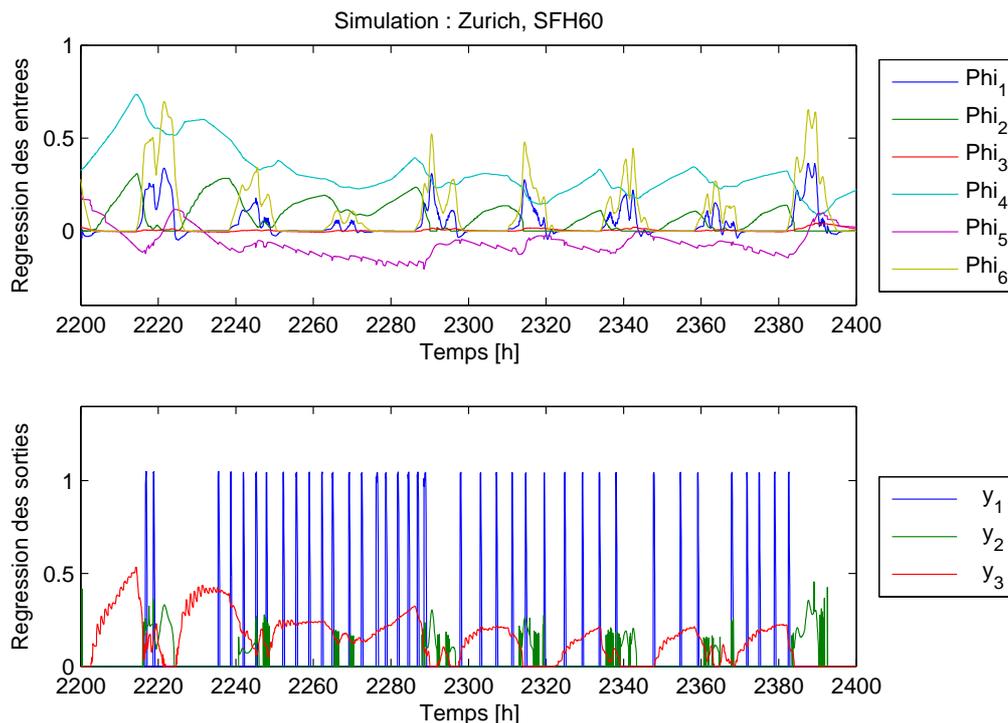


Figure 2-27 Exemple de l'effet des vecteurs de régression sur les signaux d'une partie de la séquence annuelle

Les besoins en ECS ne sont pas pris en compte aux bornes du réseau de neurones. Jusqu'à présent, aucun des systèmes testés, réels et virtuels, n'a rencontré de difficultés pour répondre à la demande d'ECS. Pour avoir un réseau le plus parcimonieux possible, l'hypothèse retenue pour l'instant est que le système fournit de l'ECS à la température désirée $T_{set,dhw}$. Ainsi, la sortie de la partie « Boîte Noire » est simplement calculée par l'équation (2-46). Cet aspect devra être repris dans des travaux ultérieurs pour prendre en compte les éventuels défauts de systèmes en cas de demande en ECS non satisfaite.

$$\dot{Q}_{dhw} = \dot{m}_{dhw} \cdot c_{p,wat} \cdot (T_{set,dhw} - T_{tap}) \quad (2-46)$$

Ces variables adimensionnelles devraient permettre aux réseaux de neurones de simuler et généraliser le comportement des SSC pour différentes charges de chauffage et conditions climatiques.

2.2.3.2. Application non-linéaire

La partie « Boîte Noire » proposée dans ce projet est un modèle non-linéaire statique (voir paragraphe 2.2.1.2). L'application non-linéaire qui la constitue est un réseau de neurones de type « feedforward » (voir paragraphe 2.1.3.3). Il n'existe pas de méthode pour déterminer a priori quelle structure est la plus optimisée pour simuler un processus. La détermination d'un modèle correct pour chaque SSC testé passe donc par l'examen de plusieurs structures différentes. Par le biais de très nombreux tests initiaux, une structure globale plus précise a été retenue pour limiter le nombre de réseaux à tester pour chaque SSC.

CHAPITRE 2

La fonction d'activation de chaque neurone est une tangente hyperbolique (même pour la couche de sortie). Une seule couche cachée est considérée : il semble que le fait d'augmenter le nombre de couches rende plus complexe l'usage des algorithmes d'apprentissage sans forcément augmenter la performance des modèles de manière considérable.

La structure finale des réseaux de neurones à tester est représentée sur la Figure 2-28.

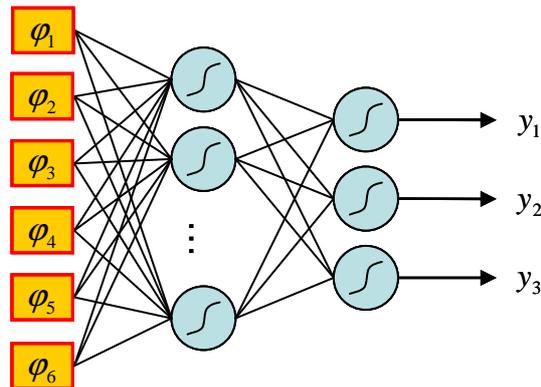


Figure 2-28 Structure de réseau retenue pour apprendre le comportement des SSC

Finalement, les réseaux ne diffèrent que par leur nombre de neurones dans la couche cachée. L'enjeu principal maintenant est trouver le nombre de neurones adéquat. Avec trop peu de neurones, le réseau ne sera pas capable d'apprendre suffisamment le procédé. Avec trop de neurones, le réseau apprendra trop bien la séquence d'entraînement et ne sera pas capable de généraliser le fonctionnement du SSC pour d'autres environnements. Il n'existe pas de règle théorique pour déterminer le bon nombre de neurones à utiliser. Le processus d'entraînement et de sélection de modèle de SSC, décrit dans le paragraphe ci-après, teste successivement plusieurs réseaux, de complexité (nombre de neurone) croissante.

Pour limiter le nombre de recherches du meilleur réseau, il est possible d'estimer grossièrement le nombre maximum de neurones à utiliser grâce à la règle de Widrow, décrite dans [Widrow et Stearns, 1985] : le nombre d'échantillons d'entraînement N_{tp} doit être plus grand que N_{sw} , le nombre de poids synaptiques à identifier, divisé par l'erreur tolérée ε_{tol}

$$N_{tp} \geq \frac{N_{sw}}{\varepsilon_{tol}} \quad (2-47)$$

A partir de cette règle, le nombre maximum de neurones cachés peut être calculé. Puisqu'une seule couche cachée est considérée et qu'un biais est ajouté à chaque neurone, y compris les neurones de sorties (voir le paramètre γ , paragraphe 2.1.3.1), N_{sw} peut être exprimé avec N_i , le nombre d'entrées, N_o , le nombre de sorties et N_n , le nombre de neurones.

$$N_{sw} = (N_i + 1).N_n + (N_n + 1).N_o = N_n.(N_i + N_o + 1) + N_o \quad (2-48)$$

Ainsi, le nombre maximum de neurone dans la couche cachée peut être exprimé par l'équation (2-49).

$$N_{n,max} = \frac{\varepsilon_{tol}.N_p - N_o}{N_i + N_o + 1} \quad (2-49)$$

Pendant la phase de sélection, des réseaux de complexités allant de 1 à $N_{n,max}$ neurones seront entraînés. Par exemple, dans le cas où l'on a 6 entrées, 3 sorties, 576 échantillons (12 jours de tests avec un pas de temps de 30 minutes, voir paragraphe 3.1.2) et une tolérance de 10%, le processus entrainera des réseaux pouvant avoir 5 neurones dans la couche cachée. Le processus complet est expliqué en détail dans le paragraphe 2.3 ci-dessous.

2.3. Apprentissage du modèle global de SSC

2.3.1. Principe généraux sur l'optimisation paramétrique de modèles

Dans la modélisation « Boîte Noire » de processus, après avoir retenu une structure a priori du modèle, il faut déterminer le jeu de paramètre θ optimal qui rapproche le plus possible le modèle $g(\varphi, \theta)$ du processus. Pour cela, il faut chercher à minimiser une fonction de coût représentative des différences entre les valeurs mesurées d'une « séquence d'apprentissage » et les valeurs calculées par le modèle. Dans la plupart des cas, cette fonction de coût J est la somme quadratique des erreurs sur chaque échantillon de la séquence d'entraînement (Equation (2-50)).

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \varepsilon(i)^2 = \sum_{i=1}^{N_p} (y(i) - g(\varphi(i), \theta))^2 \quad (2-50)$$

Dans le cas de modèles linéaires par rapport à leurs paramètres (quand $g(\varphi(t), \theta) = \theta^T \varphi(t)$, voir paragraphe 2.1.1.3), le minimum de la fonction de coût peut directement être calculé. En annulant, dans ce cas, la dérivée de J par le vecteur des paramètres, la formule des moindres carrés est obtenue (Equation (2-51)).

$$\theta_{mc} = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T y^t \quad (2-51)$$

Dans le cas de modèles non-linéaires par rapport à leurs paramètres, l'estimation de ceux-ci ne peut pas se faire directement et exige la minimisation itérative de la fonction de coût, qui de plus, possède plusieurs minima locaux. Le schéma principal de ces méthodes itératives est décrit par l'équation (2-52).

$$\theta_{j+1} = \theta_j + \Delta\theta_j \quad (2-52)$$

Chaque algorithme d'optimisation propose son propre calcul de $\Delta\theta_j$. La plupart d'entre eux se base sur le calcul du gradient de la fonction de coût $\nabla J(\theta_j)$ (algorithmes à directions de descente). L'idée est de s'approcher itérativement du vecteur des paramètres θ optimal en suivant l'inverse de ce gradient, avec l'aide d'un pas d'apprentissage μ_j : la modification des poids synaptiques suit la direction vers laquelle la fonction d'erreur diminue le plus vite (c'est-à-dire vers la direction opposée à son gradient).

$$\Delta\theta_j = -\mu_j \cdot \nabla J(\theta_j) \quad (2-53)$$

Dans le cas de réseaux de neurones « feed-forward » à fonction d'activation dérivable pour chaque neurone, ce gradient peut être astucieusement calculé par la technique de « retro-propagation » de l'erreur, décrite dans [Rumelhart and al, 1986]. Elle consiste à évaluer le gradient en partant de l'erreur commise au niveau des neurones de sorties puis en remontant vers les entrées.

Globalement, les algorithmes diffèrent dans leur manière de calculer le pas d'apprentissage μ_j . Certains, qualifiés d'algorithmes du premier ordre, utilisent un pas fixe, comme la méthode du gradient simple (ou « steepest descent ») décrit dans [Battiti, 1992]. Cette approche semble simple et efficace mais présente de nombreux inconvénients :

- En fonction du taux d'apprentissage, la décroissance du coût peut être très lente, ou le coût peut osciller, voire augmenter ;
- La performance de l'algorithme dépend énormément de la surface de la fonction de coût : cette dernière peut être facilement « bloquée » dans un minimum local ou même sur un plateau puisque dans ces conditions le gradient de la fonction est très faible.

D'autres algorithmes, dits du second ordre, s'inspirent de la méthode de Newton et modifient le jeu de paramètres en fonction de la dérivée seconde de la fonction de coût, appelée matrice Hessienne H pour une fonction multivariable. Les algorithmes du second ordre tentent d'approximer l'inverse de la matrice Hessienne de la fonction de coût, comme par exemple la méthode BFGS [Dennis and Schnabel, 1983]. Leur principe de récurrence est exprimé par l'équation (2-54).

$$\begin{aligned} B_j &\approx (H(\theta_j))^{-1} \\ \Delta\theta_j &= -\mu_j \cdot B_j \cdot \nabla J(\theta_j) \end{aligned} \quad (2-54)$$

L'algorithme de Levenberg-Marquardt, bien connu pour les problèmes d'optimisation, mélange les deux familles d'algorithme d'apprentissage [Marquardt, 1963]. Sa relation de récurrence est décrite par (2-55). Elle présente l'avantage d'être plus stable et de trouver une solution même avec une initialisation loin du minimum.

$$\Delta\theta_j = -(B_j + \lambda_j I)^{-1} \cdot \nabla J(\theta_j) \quad (2-55)$$

Même si les algorithmes du second ordre sont particulièrement bien armés pour faire face à ce problème, le piège des minima locaux de la fonction de coût peut toujours fausser les résultats. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser plusieurs entraînements avec des initialisations de paramètres différents.

Le but d'un entraînement de modèle n'est pas forcément de réduire autant que possible la fonction de coût sur la séquence d'entraînement. Dans ce cas, le réseau risque d'être « surentraîné » et ne pourra pas généraliser ses connaissances. Pour éviter ce problème de surapprentissage, il existe deux stratégies principales :

- La stratégie de l'« arrêt prématuré » qui stoppe l'algorithme avant la convergence complète de l'algorithme. Elle consiste à diviser les échantillons d'informations disponibles en une base d'entraînement et une base de validation. A chaque itération de l'algorithme, le nouveau jeu de paramètres est calculé à partir de la base d'entraînement puis une simulation du processus est réalisée à partir de la base de validation et l'erreur d'estimation est calculée. L'entraînement est arrêté en fonction de l'évolution de l'erreur de validation au fur et à mesure des itérations (généralement dès que l'erreur commence à augmenter après avoir diminué).

- La stratégie de « régularisation » consiste à ajouter un terme supplémentaire à la fonction de coût afin de favoriser les fonctions régulières, ce qui évite le surajustement du réseau. Les régularisations les plus communément utilisées ajoutent une fonction qui pénalise les poids élevés. Les calculs sont plus lourds mais l'avantage de cette stratégie est de pouvoir profiter pleinement des informations contenues dans la totalité de la séquence d'apprentissage, ce qui favorise la généralisation du modèle.

2.3.2. Le processus d'entraînement sélectionné

Une fois qu'une séquence d'entraînement est obtenue à partir d'un test d'un SSC sur le banc d'essai et que les paramètres nécessaires sont récoltés pour compléter la partie « Boîte Blanche », les données sont utilisées pour entraîner plusieurs réseaux de neurones (à partir de la structure proposée dans le paragraphe 2.2.3). Les considérations faites dans les différents paragraphes de ce chapitre ont permis de sélectionner et de construire un processus commun d'entraînement de réseau, représenté par la Figure 2-29.

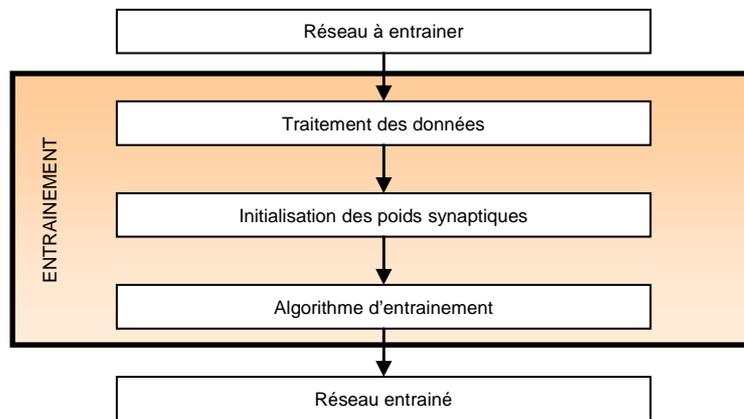


Figure 2-29 Schéma du processus d'entraînement de réseaux de neurones

2.3.2.1. Traitement des données

Les données issues du test d'un SSC sur le banc d'essai sont traitées pour obtenir une séquence d'entraînement sous une forme standardisée. Quelle que soit la fréquence d'enregistrement des données pendant l'essai (le pas de temps est généralement de l'ordre de la minute), celle-ci est remise à un pas de temps Δt à choisir selon les considérations suivantes :

→ Δt doit être suffisamment court pour traduire correctement le comportement dynamique du système. Nous ne cherchons pas ici à reproduire fidèlement les règles de régulation qui peuvent peut-être agir à haute fréquence sur le SSC mais uniquement à retranscrire les échanges de flux de chaleurs entre les éléments. On considère donc que Δt doit être inférieur aux constantes de temps des principaux éléments inertiels du SSC;

→ un Δt suffisamment long permet de réaliser l'ensemble du processus décrit dans ce paragraphe plus rapidement et coûte beaucoup moins en terme de mémoire informatique. De plus, il permet d'obtenir des signaux d'entrées et sorties plus lisses, ce qui peut faciliter l'entraînement des réseaux de neurones.

En considérant les constantes de temps de différents types de capteurs solaires (éléments qui présentent le moins d'inertie parmi les principaux éléments des SSC), la valeur de Δt a été fixée à 30 minutes pour l'étude présentée dans ce mémoire et semble être un bon compromis entre les considérations prises ci-dessus. Un pas de temps inférieur pourra être éventuellement envisagé pour des travaux ultérieurs.

La partie « Boîte Blanche » est appliquée à la séquence d'entraînement pour évaluer l'état du système pendant l'essai. Les erreurs de la partie « Boîte Blanche » sont ainsi incluses aux bornes du réseau, pour que celui-ci apprenne à les gérer correctement.

2.3.2.2. *Initialisation des poids synaptiques*

Les poids synaptiques initiaux du réseau de neurones sont déterminants pour la convergence de l'algorithme d'optimisation et la solution trouvée. Plusieurs initialisations du réseau sont testées.

Certaines méthodes d'initialisation des poids synaptiques améliorent l'entraînement du réseau de neurones. Celle utilisée dans ce processus d'entraînement est la méthode de Nguyen-Widrow [Nguyen and Widrow, 1990]. Le principe de cette méthode est de générer aléatoirement des poids synaptiques tout en veillant à ce que la distribution des régions actives de chaque neurone (zone où les fonctions d'activation ont une dérivée significative) soit quasi-uniformément répartie dans l'espace des entrées. Tous les neurones sont ainsi mieux pris en compte dès le début de l'apprentissage et l'algorithme pourra converger vers une solution convenable plus rapidement.

2.3.2.3. *Algorithme d'entraînement*

Face au panel très large d'algorithmes d'optimisations disponibles, le choix s'est porté sur celui de Levenberg-Marquardt qui, par sa réalisation et sa notoriété, semble être un algorithme relativement efficace.

Pour tirer pleinement profit des informations contenues dans la séquence d'entraînement, la stratégie d'arrêt prématuré (expliqué dans le paragraphe 2.3.1) est écartée. Une régularisation de type « Bayésienne » est utilisée en complément de l'algorithme de Levenberg-Marquardt [Mackay, 1992].

2.3.3. Le processus de sélection

L'entraînement d'un réseau de neurones pour modéliser le comportement d'un SSC ne peut se faire simplement en appliquant un algorithme d'optimisation :

- la structure du « modèle-hypothèse » (voir paragraphe 2.1.1.3) n'est pas complète et nécessite de « tester » plusieurs réseaux de complexités différentes (paragraphe 2.2.3) ;
- les algorithmes itératifs d'optimisation peuvent être piégés par des minima locaux de la fonction de coût et nécessitent donc plusieurs réinitialisations pour assurer un résultat correct (paragraphe 2.3.1).

L'entraînement de nombreux réseaux est nécessaire. L'identification d'un modèle correct, reproduisant le comportement du SSC de manière suffisamment fidèle, passe par une phase de sélection qui a pour base la même séquence d'entraînement.

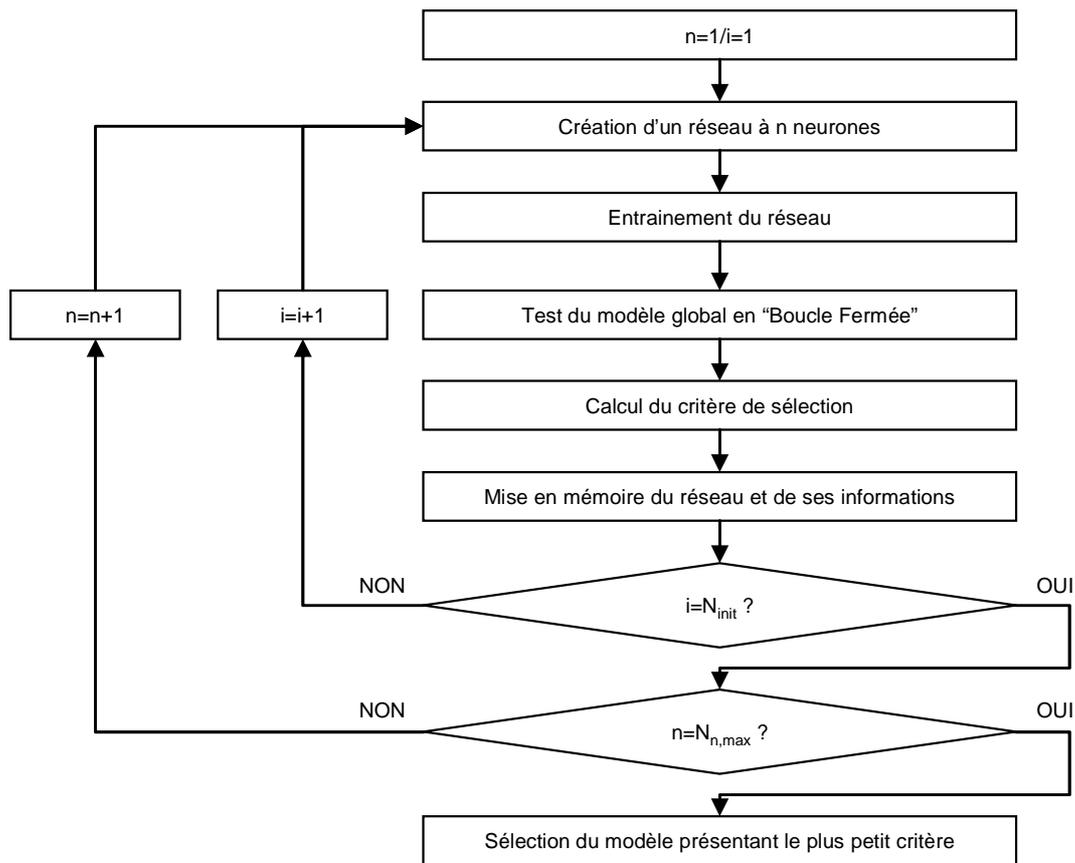


Figure 2-30 Sélection d'un modèle représentant le SSC testé

2.3.3.1. Les structures à tester

Les structures à tester sont les réseaux de complexités différentes allant de 1 à $N_{n,max}$ neurones dans la couche cachée (voir paragraphe 2.2.3.2). Pour chacune de ces structures, N_{init} réseaux de poids synaptiques initiaux différents sont également créés et entraînés. La sélection se fait parmi ces $N_{n,max} \times N_{init}$ réseaux de neurones.

2.3.3.2. Le test en Boucle Fermée sur la séquence d'entraînement

Pour tester la qualité de généralisation d'un réseau de neurone fraîchement entraîné, il faut pouvoir soumettre ce dernier à une séquence de données inédite (tests supplémentaires ou données non utilisées pour l'entraînement par exemple) et comparer ses estimations aux valeurs attendues. Or, comme indiqué dans le paragraphe 2.3.4.1, la séquence envisagée pour le test des SSC dure 12 jours et est donc trop courte pour que l'on se permette de prélever quelques données pour une validation ultérieure, sans avoir de lourdes conséquences sur la qualité d'apprentissage des réseaux de neurones.

Cependant, il est possible d'utiliser la même séquence d'entraînement pour réaliser un premier test de généralisation du modèle. En effet, il est possible de tirer profit du fait que l'apprentissage du modèle « Boîte Grise » se fasse de manière « Boucle Ouverte » : les états du système sont fixés lors de la phase de traitement des

données et ne sont pas influencés par les erreurs du réseau. Ce dernier a donc appris le comportement du SSC avec des états « idéaux ». Il est donc intéressant de voir si le modèle complet ainsi obtenu est stable et précis dans des conditions de simulation en « Boucle Fermée » de la séquence d'entraînement. Dans ce cas, le réseau montre s'il est capable de gérer ses propres erreurs. Les réseaux surentraînés peuvent encore être exclus à cette étape.

2.3.3.3. Les critères de sélection

Pour sélectionner le réseau le plus pertinent parmi les nombreux entraînés, il faut pouvoir les comparer à partir de leur validation en « Boucle Fermée ». Des critères, inspirés de critères classiques en évaluation de modèles comme dans le paragraphe 2.2.2.1, ont ainsi été mis en place et sont calculés pour chaque sorties du modèle :

- Erreur type (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{tp}} \sum_{i=1}^{N_{tp}} (y(i) - g(\varphi(i), \theta))^2} \quad (2-56)$$

L'erreur type ($RMSE$) est le critère utilisé habituellement pour évaluer un estimateur en statistique. Il prend en compte les erreurs sur chaque pas de temps et est surtout sensible aux grandes erreurs.

- Erreur totale ($ErrTot$)

La qualité attendue pour ce genre de modèle est surtout d'estimer précisément l'énergie globale délivrée par le SSC pour n'importe quelle simulation. Même si des erreurs importantes arrivent occasionnellement, le modèle pourrait être très bien capable d'estimer correctement l'énergie d'appoint consommée sur une année. Pourtant, ce modèle a de forte chance d'avoir un critère $RMSE$ médiocre. Il est donc intéressant de pouvoir vérifier la qualité d'estimation globale du modèle grâce au critère $ErrTot$.

$$ErrTot = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tp}} (y(i) - g(\varphi(i), \theta))}{\sum_{i=1}^{N_{tp}} y(i)} \quad (2-57)$$

- Coefficient d

Pour rassembler ces deux critères de qualité de modèles en un seul critère, le coefficient d combine $RMSE$ et $ErrTot$ de la manière suivante :

$$d = \sqrt{\left(\frac{RMSE}{\alpha_{RMSE}}\right)^2 + \left(\frac{ErrTot}{\alpha_{ErrTot}}\right)^2} \quad (2-58)$$

CHAPITRE 2

α_{RMSE} et α_{ErrTot} permettent de moduler les exigences souhaitées pour chacun des critères. Le coefficient d représente ainsi une sorte de distance pondérée permettant d'exclure les mauvais modèles et de classer les autres.

Pour le projet présenté dans ce mémoire, le réseau sélectionné comme étant le plus pertinent pour modéliser un SSC testé est celui qui :

- présente un coefficient d inférieur à une limite de tolérance d_{lim} pour chaque sortie du modèle (la valeur d_{lim} est à choisir arbitrairement comme par exemple dans le paragraphe 3.1.2) ;
- présente le plus petit coefficient d en moyenne sur l'ensemble des sorties (ici \dot{Q}_{aux} , $\dot{Q}_{coll,out}$ et \dot{Q}_{em}).

Il serait envisageable dans des travaux ultérieurs de sélectionner plusieurs réseaux et de combiner leurs sorties. Mais ce point n'a pas encore été abordé.

2.3.4. Le protocole final

Le protocole final mis au point pour caractériser les performances de SSC est défini globalement de la manière suivante :

2.3.4.1. Test d'un SSC sur le banc d'essai

La première partie du test consiste à installer le SSC à étudier sur le banc semi-virtuel, comme s'il était installé dans une habitation réelle (voir paragraphe 1.2.2.1). Cette installation doit être faite dans la mesure du possible par un installateur agréé par le fabricant. Les réglages des différentes régulations doivent être faits selon l'environnement virtuel choisi pour la séquence d'entraînement.

Pendant ce temps, les paramètres propres au SSC et nécessaires à la partie « Boîte Blanche » doivent être collectés (voir paragraphe 2.2.2.5). Ces paramètres sont notamment la capacité thermique et le coefficient de pertes global du ballon ainsi que les caractéristiques de l'appoint. Les autres paramètres sont fixés en fonction de l'environnement virtuel de la séquence d'entraînement.

La séquence d'entraînement peut être appliquée par la suite. Elle consiste à confronter le SSC à un environnement virtuel, dans lequel les conditions météorologiques ont été travaillées de manière à pouvoir « exciter » le système et enregistrer ses réponses.

Généralement, en modélisation de système, des signaux d'entrées particuliers peuvent être appliqués pour optimiser la séquence d'entraînement et y retirer le maximum d'information nécessaire pour l'identification d'un modèle. Les Signaux Binaires Pseudo Aléatoires (SBPA), définis dans [Godfrey, 93] en sont un exemple. Cependant, la création de ces signaux est basée sur les temps caractéristiques du système à tester (la durée d'une séquence complète est égale à plusieurs fois la constante de temps du système). Or dans le cas d'un SSC, le ballon de stockage présente déjà à lui seul une constante de temps pouvant aller jusqu'à une dizaine de jours selon son efficacité thermique et sa capacité.

L'objectif à long terme de ces travaux de recherche est de faire évoluer les textes normatifs concernant les SSC en proposant une méthodologie complète de

caractérisation de leurs performances à partir d'un test en laboratoire. Ce dernier doit donc être nécessairement d'une durée raisonnable (et donc d'un coût raisonnable) pour pouvoir être intégrée dans un processus de standardisation de produits. Une séquence type SBPA serait donc beaucoup trop longue pour l'application normative envisagée pour cette méthode.

De plus, le SSC serait confronté durant son test à des configurations de charges physiquement irréalistes ou irréalisables (changements brusques de températures, d'ensoleillement,...). L'idée de se baser sur des simulations de journées réelles semble donc plus appropriée. La séquence d'essai doit être courte. Plutôt que de chercher à exciter le système dans toutes les configurations possibles, il faut se concentrer sur les situations rencontrées quotidiennement par le SSC en fonctionnement usuel. La séquence « 12 jours » de la méthode SCSPT semble remplir cet objectif. Elle regroupe des journées représentatives de chaque mois tout en cherchant à reproduire le profil annuel de charge du ballon de stockage. C'est pourquoi le choix de la séquence « 12 jours » pour le test des SSC a été adopté pour cette étude (voir paragraphe 1.2.2.3).

Le protocole expérimental est donc le même que celui de la méthode SCSPT (voir paragraphe 1.2.2). La seule différence est que les modèles composant la partie « Boîte Blanche », définis dans le paragraphe 2.2.2, remplacent les modèles de la Tâche 32 initialement utilisés. Outre l'avantage d'avoir les mêmes modèles en phase de test qu'en phase d'apprentissage pour optimiser l'entraînement de réseaux de neurones, l'adaptation de modèles normalisés pour les tests de la méthode SCSPT confère à celle-ci des éléments de calculs plus appropriés à sa reconnaissance dans les domaines scientifiques, industriels et normatifs. Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire apportent donc de multiples améliorations à la méthode SCSPT.

Les données à récupérer lors de ce test sont présentés dans le Tableau 2-11.

Climat	ECS	Appoint	Capteur	Emetteur	Bâtiment
T_a	\dot{m}_{dhw}	\dot{Q}_{aux}	\dot{m}_{coll}	\dot{m}_{em}	$\dot{Q}_{b,int}$
θ_s	T_{tap}		$T_{coll,in}$	$T_{em,in}$	
γ_s	T_{dhw}		$T_{coll,out}$	$T_{em,out}$	
G_b					
G_d					

Tableau 2-11 Variables à récupérer lors d'un test de SSC sur le banc d'essai

2.3.4.2. Modélisation et simulations du SSC testé pour la caractérisation de ses performances

Une fois l'ensemble des données et paramètres récupéré, le processus d'entraînements et de sélection, défini dans les paragraphes 2.3.2 et 2.3.3, peut être appliqué. Un modèle complet du SSC testé sera ainsi obtenu.

Une fois un modèle correct de SSC déterminé, celui-ci pourra être utilisé pour réaliser plusieurs simulations annuelles pour différents types de bâtiments, de climats et de surfaces de capteurs. Ces données permettront de caractériser les performances du SSC à l'aide de la méthode FSC (voir paragraphe 1.1.3.3).

2.4. Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de déterminer comment il est possible d'identifier un modèle complet de SSC à partir d'une séquence d'essai.

Après avoir étudié les techniques de modélisation de processus à partir de données expérimentales, une structure de modèle a priori est présentée dans ce chapitre. Compte tenu du fonctionnement général des SSC et des contraintes expérimentales, il semble judicieux d'adopter une classe de modèle « Boîte Grise », composée d'une partie « Boîte Blanche » linéaire dynamique et d'une partie « Boîte Noire » non-linéaire statique.

La partie « Boîte Blanche » est constituée de modèles simplifiés issus de textes normatifs pour les principaux éléments d'un SSC : capteurs, émetteurs de chaleur, bâtiment, stockage de la chaleur et système d'appoint. Elle permet de renseigner de manière dynamique l'état du système c'est-à-dire les niveaux de températures de chacun de ces éléments. Pour l'instant, seuls les émetteurs de type « radiateur à eau chaude », les stockages hydrauliques et les appoints de type « chaudière à combustion gaz » ont été abordés. Cette partie devra être complétée par d'autres modèles simplifiés pour adapter cette approche à toutes les familles de SSC (notamment ceux en relation avec un plancher chauffant). L'utilisation de modèles simplifiés, rendue nécessaire à la fois par le type d'essais et les techniques d'apprentissage, n'est pas sans petites lacunes, notamment au niveau de la modélisation du ballon et de la chaudière d'appoint. Celles-ci doivent être prises en charge par la partie « Boîte Noire » pour permettre une bonne qualité du modèle global de SSC.

La partie « Boîte Noire » représente la particularité de chaque SSC. Elle doit être capable de retranscrire le comportement propre au SSC testé après un apprentissage dont la base est fournie par un test sur le banc d'essai. En raison de leur capacité à apprendre des phénomènes non linéaires et de leur popularité grandissante, y compris dans le domaine des énergies renouvelables, les réseaux de neurones ont été choisis pour constituer cette partie.

Identifier un tel modèle à partir d'une séquence de test passe d'abord par l'entraînement de nombreux réseaux. Un processus d'entraînements multiples et de sélection d'un modèle parmi ceux entraînés a été mis en place. Le protocole final envisagé est basé sur celui de la SCSPT (avec quelques légères modifications dans l'environnement virtuel) auquel est ajoutée l'étape d'identification d'un modèle.

Les travaux développés dans ce chapitre, s'ils sont validés, permettraient à la méthode SCSPT de caractériser complètement les SSC à partir d'une séquence de 12 jours, en se basant sur des éléments de calculs normalisés, ce qui faciliterait sa reconnaissance par les milieux scientifiques, industriels et normatifs.

Il en reste donc plus qu'à valider cette nouvelle approche.

CHAPITRE 3. Expérimentation numérique pour la validation de la nouvelle approche

Résumé du chapitre

La méthodologie mise au point dans le Chapitre 2 complète les essais de la méthode SCSPT pour pouvoir évaluer les performances énergétique des SSC quel que soit l'environnement étudié (bâtiment, climat, surface de capteurs solaires). Elle se base sur les données issues d'une séquence caractéristique de 12 jours de test sur banc d'essai semi-virtuel afin de définir un modèle complet de type « Boîte Grise » des systèmes étudiés. Avant de passer à la phase pratique de l'application de ce test, il est nécessaire de valider l'approche à l'aide de simulations de modèles détaillés de SSC sous TRNSYS.

Pour cela, 3 modèles de SSC ayant des stratégies différentes et déjà utilisés dans des précédents projets ont été sélectionnés. Ces modèles sont soumis à deux types de simulation :

- une simulation avec la séquence météorologique de 12 jours correspondant au test SCSPT, qui fournit les données d'entraînement du modèle « Boîte Grise »;
- 27 simulations annuelles avec climats, bâtiments et surfaces de capteur différents, qui fournissent les données pour les validations.

La qualité de la nouvelle approche proposée, testée dans ce chapitre, se mesure par la précision des estimations des énergies mises en jeu au niveau de l'appoint, des capteurs et des émetteurs de chaleur de chaque SSC par rapport aux résultats des calculs réalisés avec le logiciel TRNSYS. La caractérisation des 3 SSC par la méthode FSC selon les deux types de modélisation est également comparée.

Une analyse détaillée des résultats obtenus lors de cette étude permet de dégager les points forts et les points à améliorer de la méthodologie proposée.

3.1. Le protocole de validation

Un protocole est mis en place dans ce paragraphe pour pouvoir valider la méthodologie mise au point dans le CHAPITRE 2, à partir de n'importe quel modèle détaillé de SSC (système modélisé sous TRNSYS par exemple). Ce protocole est schématisé sur la Figure 3-1 (les cases bleues impliquent le modèle détaillé du SSC alors que les cases orange impliquent ses modèles « Boîte Grise » identifiés).

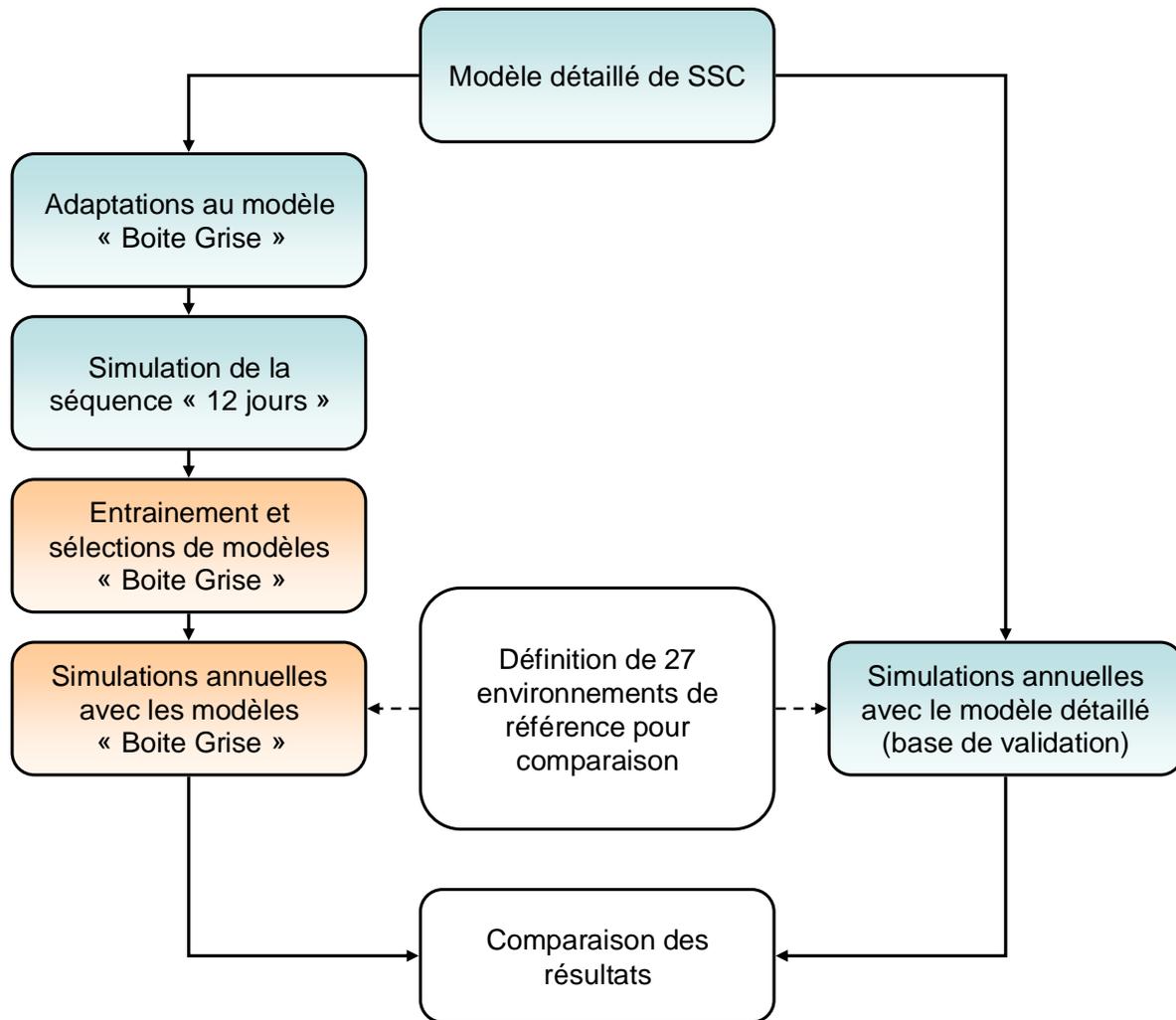


Figure 3-1 Schéma représentant le protocole de validation de l'approche étudiée à partir d'un modèle détaillé de SSC

Ce protocole instaure une base en termes de simulations à réaliser (sous TRNSYS par exemple) et fixe les paramètres du processus d'entraînement et sélection de réseaux de neurones. Il propose également des critères permettant de comparer les résultats issues des deux types de modélisation (modélisation neuronal et modélisation détaillée) afin d'évaluer la qualité des modèles « Boîte Grise » identifiés à partir de la séquence « 12 jours ». Il sera appliqué à 3 modèles détaillés de SSC, présentés dans le paragraphe 0.

3.1.1. Les environnements de références

Les environnements de référence définissent les simulations TRNSYS à réaliser à la fois pour l'entraînement de modèles neuronaux et pour la validation des estimations de ces derniers.

3.1.1.1. Climats

Les climats sélectionnés pour constituer les différents environnements de références sont 3 climats utilisés lors de la Tâche 32 de l'IEA [Heimrath et Haller, 2007] : Barcelone¹³, Zurich et Stockholm. Ces climats ont été choisis pour couvrir les étendues géographiques des principaux marchés européens (sud, centre et nord). Ils sont donc assez différents. Par exemple, le climat de Stockholm présente peu de ressource solaire avec une forte demande de chauffage pendant la saison de chauffe alors que le climat de Barcelone est complètement à l'opposé de ce cas.

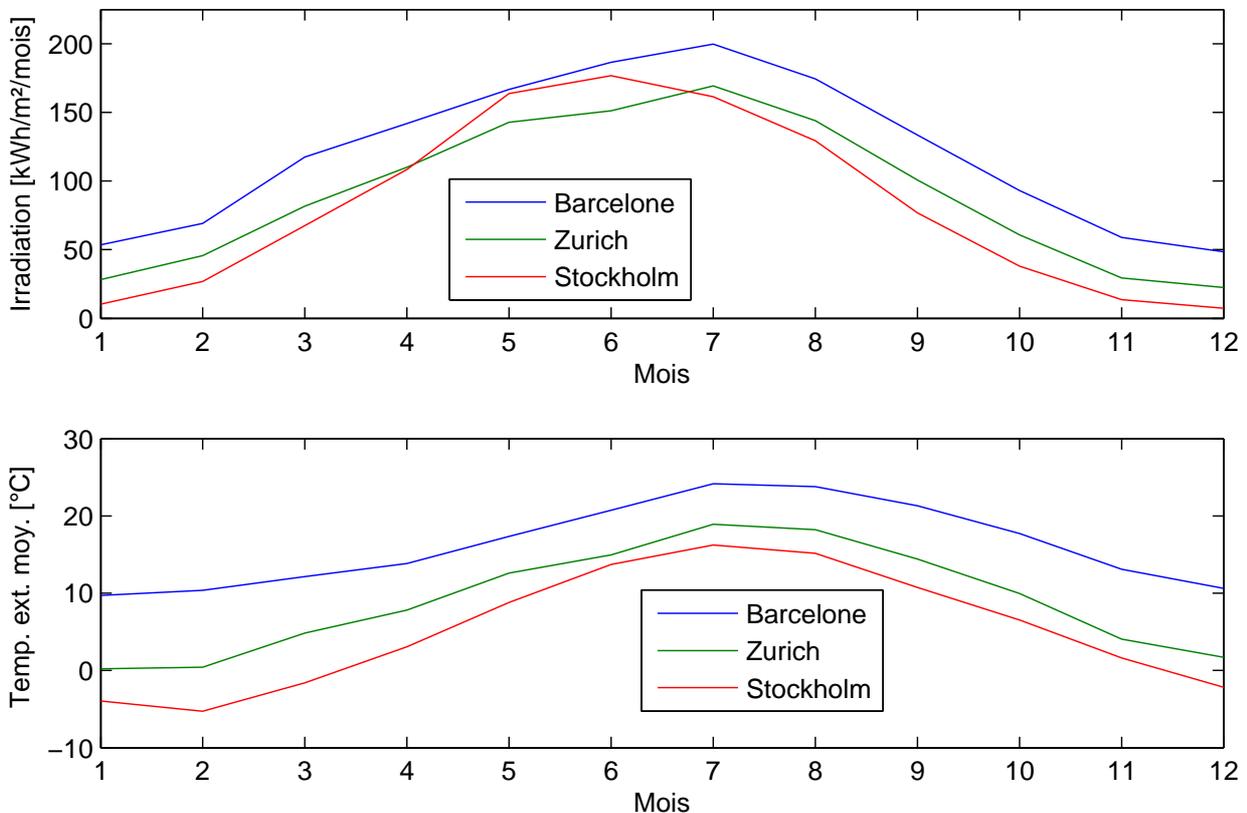


Figure 3-2 Irradiations mensuelles sur une surface horizontale et températures moyennes mensuelles pour les trois climats de référence

Pour les simulations annuelles, les données climatiques sont générées à l'aide du logiciel METEONORM¹⁴, qui calcule les données nécessaires à partir de moyennes

¹³ Le climat de Madrid est aussi un climat de référence de la Tâche 32. Il n'a pas été choisi ici car l'aspect humidité de l'air n'est pas pris en compte dans ce projet. Le climat de Barcelone qui présente une saison de chauffe un peu plus courte est néanmoins assez représentatif des deux sites.

¹⁴ METEONORM, Weather Data Generator. METEOTEST, Fabrikasse 14, CH-3012 Bern, Switzerland ; www.meteonorm.com

mensuelles d'ensoleillement et de température, enregistrées sur du long-terme pour chaque climat.

Pour l'entraînement de modèles neuronaux, les séquences « 12 jours » correspondantes, créées selon la méthode SCSPT [Albaric et al., 2008], sont utilisées. Ces séquences étant courtes, leur dernière journée est reproduite au début de la simulation du système à tester pour que celui-ci soit chargé de manière réaliste au début des 12 jours de tests. Les résultats correspondant à cette première journée ne sont pas pris en compte et ainsi les surconsommations de préchauffage qui seraient apparues sans cette initialisation ne perturbent pas l'apprentissage des modèles.

Les paramètres communs, caractérisant chaque climat (voir Tableau 3-1), sont utilisés pour le dimensionnement du réseau de chauffage (avec la température extérieure de base $T_{a,d}$, voir équation (3-2)) et pour la définition du profil de la température d'eau froide (avec sa température moyenne $T_{tap,av}$, son amplitude ΔT_{tap} et son décalage temporel d_{off} , voir équation (1-20)).

Climat	$T_{a,d}$ [°C]	$T_{tap,av}$ [°C]	ΔT_{tap} [°C]	d_{off} [jour]
Barcelone	-1	13,5	4,5	19
Zurich	-10	9,7	6,3	60
Stockholm	-17	8,5	6,4	80

Tableau 3-1 Paramètres caractéristiques de chaque climat

3.1.1.2. Puisages ECS

Le puisage ECS pour l'ensemble des simulations est défini grâce à l'outil développé par [Jordan et Vajen, 2001] pour générer un profil de puisages réaliste. Celui retenu est défini avec un pas de temps de 6 minutes (ce qui est donc compatible avec le pas de temps de 3 minutes envisagé pour les simulations des modèles détaillés de SSC, sources des données d'entraînement et de validation). Il correspond à une consommation quotidienne de 200L d'ECS à 45°C. Le fichier correspondant peut-être téléchargé sur le site du Solar Energy Laboratory¹⁵.

La température d'eau froide du réseau est considérée comme ayant une évolution sinusoïdale (équation (1-20)), en fonction du temps *time* exprimé en heure. Elle est définie par les trois paramètres $T_{tap,av}$, ΔT_{tap} et d_{off} , dépendants du climat et définis dans le paragraphe précédent. La période de la sinusoïde correspond à la durée de la séquence : le nombre de jours de la simulation $N_{day,seq}$ influence donc l'évolution de la fonction.

$$T_{tap} = T_{tap,av} + \Delta T_{tap} \sin \left(360 \cdot \frac{time + (273.75 - d_{off}) \cdot 24}{N_{day,seq} \cdot 24} \right) \quad (3-1)$$

La température de consigne de l'ECS $T_{set,dhw}$ est toujours de 45°C.

¹⁵ <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/library15.htm#IEA26Load>

3.1.1.3. Bâtiments

Les bâtiments sélectionnés pour constituer les différents environnements de simulations sont 3 bâtiments de qualité d'isolation thermique différente et utilisés dans la Tâche 32 de l'IEA. Ils sont appelés SFH30, SFH60 et SFH100.

Leur architecture commune et leurs caractéristiques sont définies dans [Heimrath et Haller, 2007]. Ces bâtiments sont supposés accueillir une seule famille (Single Family House) et ont des besoins de chauffage respectivement de 30, 60 et 100 kWh/m² par an pour le climat de Zurich. Des profils d'apports de chaleur internes, dus à la fois aux habitants et aux appareillages électriques, sont établis (voir Figure 3-3). Il n'y a pas de distinction entre les jours de semaine et de week-end pour l'occupation des habitants mais il y en a une pour l'utilisation des appareils électriques.

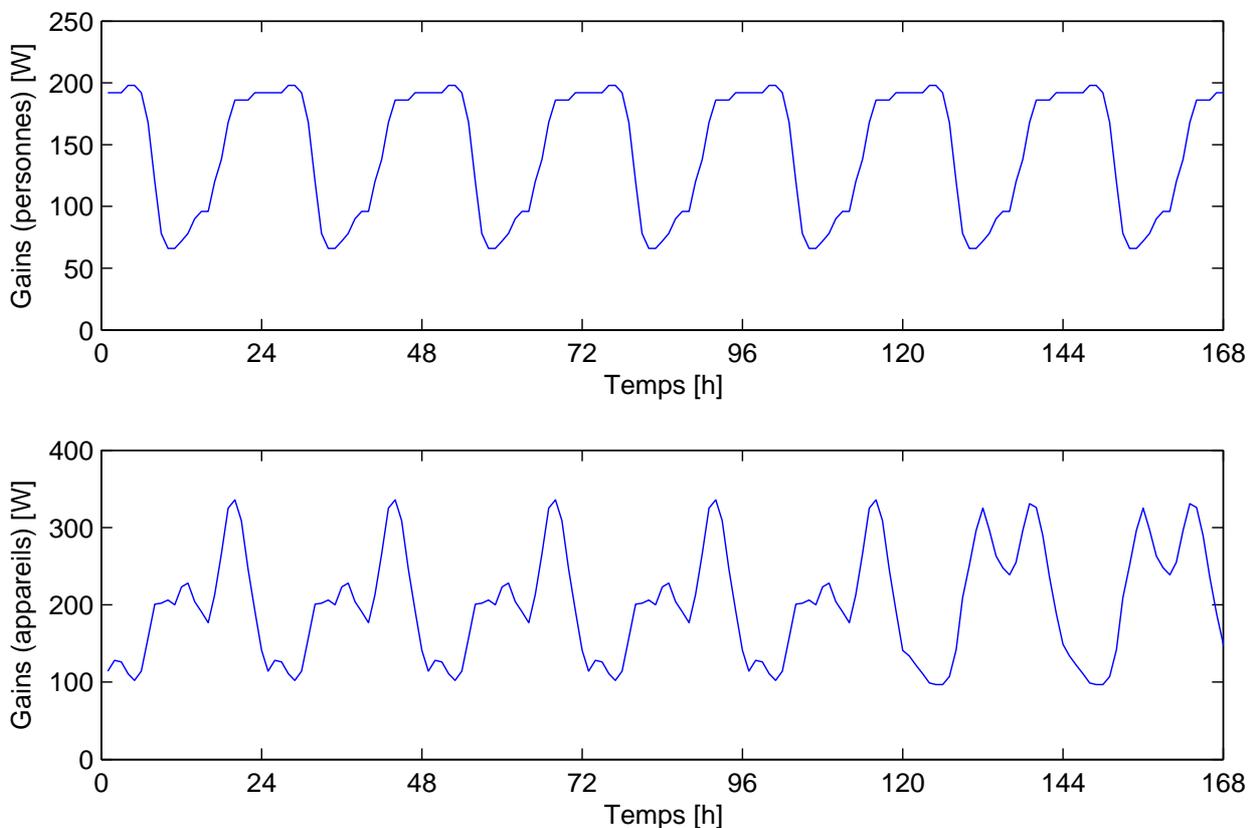


Figure 3-3 Profil hebdomadaire des gains de chaleur internes au bâtiment dus à la présence des habitants et à l'utilisation d'appareils électriques

Pour les simulations annuelles de validation (voir la « base de validation » dans la Figure 3-1), les modèles détaillés de ces bâtiments sont utilisés. Ils sont définis sous TRNSYS à l'aide du Type 56 [Type56, 2005]. Leurs fichiers caractéristiques (.bui) sont disponibles avec le modèle du SSC de référence de la Tâche 32, téléchargeable sur le site de l'IEA¹⁶. Ils sont également équipés de protections anti-surchauffes estivales (casquettes sur les fenêtres sud, stores vénitiens, ventilation nocturne), programmés de manière précise. Le fait de garder les modèles détaillés

¹⁶ <http://www.iea-shc.org/task32/>

pour ces validations permettra une comparaison plus juste avec les résultats obtenus lors de travaux de l'AIE.

Pour les simulations d'apprentissage des modèles neuronaux (voir « Adaptations au modèle Boîte Grise » dans la Figure 3-1), l'idéal est d'avoir le même support lors des simulations TRNSYS et dans le modèle global « Boîte Grise » de SSC. L'entraînement est ainsi plus efficace. Par conséquent, la description mathématique du comportement thermique des bâtiments du type ISO 13790-2008, définie dans le paragraphe 2.2.2.3, est utilisée. Les paramètres de ce modèle sont calculés pour correspondre à la description de chacun des bâtiments. Ces calculs sont détaillés dans l'ANNEXE A. Contrairement aux simulations annuelles de référence, aucune protection de surchauffe estivale n'est active dans ce cas car elles ne sont pas intégrées aux modèles « Boîte Grise » des SSC.

3.1.1.4. Radiateurs

Les modèles de bâtiments sont couplés à des radiateurs à eau chaude pour répondre aux besoins de chauffage. Ces radiateurs ont en commun, quels que soient les modèles et les bâtiments, l'exposant n caractérisant les échanges de chaleur entre le radiateur et l'air intérieur. Celui-ci est fixé à 1,3.

Le dimensionnement des radiateurs dépend à la fois du bâtiment et du climat. Pour simplifier le paramétrage, un premier dimensionnement est défini en fonction du climat de Zurich : les radiateurs de chaque bâtiment sont ainsi caractérisés par une puissance de charge $\dot{Q}_{sh,d,Zurich}$ ainsi que par les températures d'entrée $T_{em,in,d}$ et de sortie $T_{em,out,d}$ correspondantes.

Bâtiment	$\dot{Q}_{sh,d,Zurich}$ [W]	$T_{em,in,d}$ [°C]	$T_{em,out,d}$ [°C]
SFH30	3100	35	30
SFH60	4605	40	35
SFH100	6548	60	50

Tableau 3-2 Paramètres caractéristiques de chaque bâtiment

Pour adapter la puissance de dimensionnement à d'autres climats, il suffit d'utiliser la température extérieure de base comme le montre l'équation (3-2).

$$\dot{Q}_{sh,d} = \dot{Q}_{sh,d,Zurich} \frac{T_{set,room} - T_{a,d}}{T_{set,room} - T_{a,d,Zurich}} \quad (3-2)$$

Pour les modèles de radiateurs, on utilise la plupart du temps comme paramètre leur puissance nominale $\dot{Q}_{sh,nom}$ pour des températures données (ici 90°C en entrée, 70°C en sortie pour une pièce à 20°C). Le passage de $\dot{Q}_{sh,d}$ à cette puissance nominale dépend du modèle souhaité.

Dans le cas des simulations annuelles de validation, le modèle détaillé de radiateur (Type 362 sous TRNSYS), brièvement décrit dans le paragraphe 2.2.2.3, est utilisé. Il est basé sur un échange de chaleur proportionnel à une différence de température logarithmique. De plus, selon les simulations réalisées dans la Tâche 32 de l'IEA

[Heimrath et Haller, 2007], la puissance nominale de ce type de radiateur est basée sur sa température moyenne et peut ainsi s'exprimer par l'équation (3-3).

$$\dot{Q}_{sh,nom} = \dot{Q}_{sh,d} \left(\frac{\frac{90+70}{2} - 20}{\frac{T_{em,in,d} + T_{em,out,d}}{2} - T_{set,room}} \right)^n \quad (3-3)$$

Dans le cas des simulations pour l'entraînement des modèles neuronaux, on choisit un modèle simplifié de radiateur, en liant les échanges de chaleur à une simple différence de température. Ce modèle correspond ainsi à celui utilisé dans le modèle global de SSC (voir paragraphe 2.2.2.3). Comme il n'est constitué que d'un seul nœud de température (la température de sortie $T_{em,out}$, seule température des émetteurs connue au niveau du modèle « Boîte Grise »), l'expression de la puissance nominale des radiateurs est adaptée (équation (3-4)).

$$\dot{Q}_{sh,nom} = \dot{Q}_{sh,d} \left(\frac{70 - 20}{T_{em,out,d} - T_{set,room}} \right)^n \quad (3-4)$$

3.1.1.5. Capteur

Les capteurs sont considérés comme faisant partie des SSC étudiés. Leurs paramètres sont donc propres à chaque système. Par contre, leur surface n'est pas forcément fixée pour un système donné et va jouer sur la ressource solaire disponible et ainsi sur le calcul des performances. Il est donc intéressant de faire évoluer la surface des capteurs A_{coll} pour caractériser les performances d'un SSC.

Le choix des surfaces prend en considération l'aspect dimensionnement général des SSC. Pour cela, il est possible de s'inspirer des travaux réalisés dans le cadre de la Tache 26 du programme SHC de l'IEA, pour mettre au point la méthode FSC. Après avoir passé en revue les principaux SSC existant en Europe et leurs dimensionnement, les systèmes ont été simulés selon des plages de valeurs du rapport « Volume de stockage/Surface de capteurs » définies comme sur la Figure 3-4.

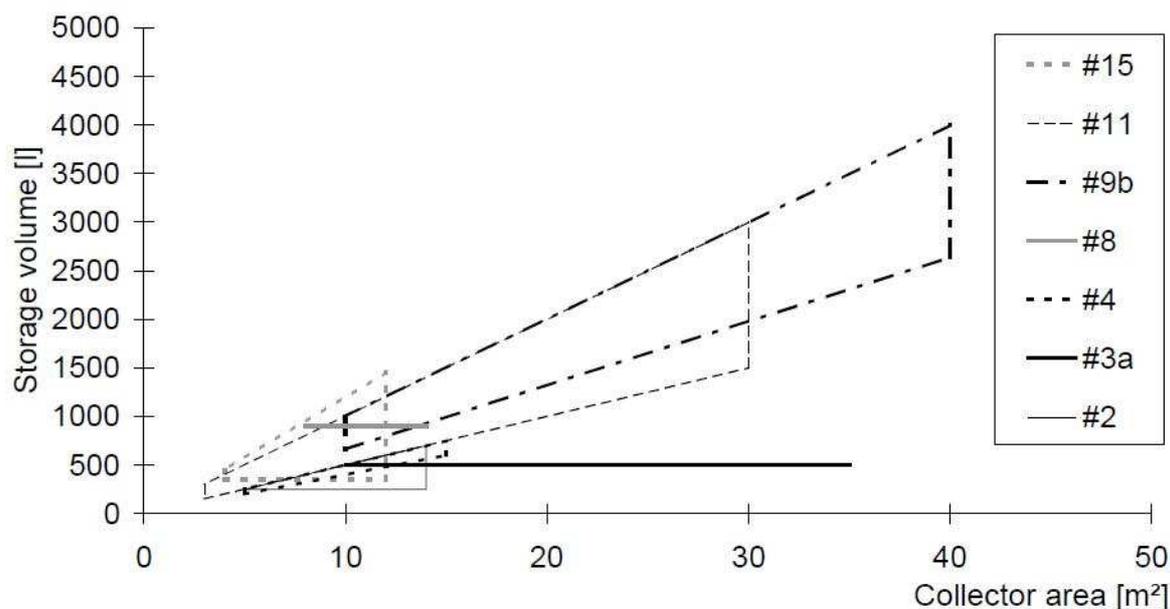


Figure 3-4 Dimensionnement des systèmes simulés lors de la Tâche 26 (les nombres précédés d'un # dans la légende se rapporte à des SSC génériques). Source : [Weiss et al., 2003]

Globalement, pour l'ensemble des systèmes, le rapport « Volume de stockage/Surface de capteurs » est généralement compris entre 50 et 125 L/m². Ainsi, en fonction du volume de stockage de chaque SSC à tester, sera-t-il possible de choisir entre 3 surfaces de capteurs correspondant aux ratios présentés dans le Tableau 3-3 (le volume de stockage V_{store} y est exprimé en m³). Lors de la séquence d'entraînement, le choix de la surface se fera en fonction des recommandations du fabricant.

Capteurs	Surface [m ²]
Cas 1	$\approx 1000.V_{store} / 50$
Cas 2	$\approx 1000.V_{store} / 70$
Cas 3	$\approx 1000.V_{store} / 125$

Tableau 3-3 Surfaces de capteur pour les différentes simulations de validation

Le modèle de capteur présenté dans le Chapitre 2 est utilisé pour chaque simulation. Pour se rapprocher des résultats de la Tâche 32, le modèle détaillé de rayonnement diffus est utilisé dans les simulations annuelles alors que l'expression simplifiée de ce rayonnement est choisie dans les simulations de la séquence d'entraînement (voir paragraphe 2.2.2.2).

3.1.1.6. Bilan

Pour cette étape de validation numérique, les conditions de simulation de la séquence d'entraînement sont présentées dans le Tableau 3-4.

Bâtiment	Climat	Surface des capteurs
SFH60	Zurich	Cas 1

Tableau 3-4 Environnement de la séquence « 12 jours » d'entraînement

CHAPITRE 3

Le bâtiment et le climat sont choisis pour leur position « centrale » en termes de ressources solaires et de besoins énergétiques. L'extrapolation des performances sera ainsi plus simple qu'avec des cas plus extrêmes.

Par contre, la plus grande surface de capteurs est choisie pour solliciter au maximum la gestion des flux de chaleur et leur stockage durant la séquence d'apprentissage. Ceci est d'autant plus intéressant que la température moyenne du ballon n'est comparée qu'à une valeur fixe dans le vecteur de régression des entrées (voir paragraphe 2.2.3.1), contrairement aux autres variables liées à des paramètres propres à chaque climat et à chaque bâtiment. La variation de cette entrée sera ainsi plus importante avec la plus grande surface des capteurs pendant la séquence d'entraînement : le réseau de neurones sera donc plus adapté à toutes les variations de la température de stockage, même les plus fortes.

Lorsque le meilleur réseau est sélectionné par le protocole, nous étudierons la capacité du modèle « Boîte Grise » ainsi formé à reproduire le comportement du SSC testé pour d'autres environnements énergétiques (nous appellerons cette capacité « généralisation » dans la suite de ce chapitre). Pour cela, le modèle « Boîte Grise » sera soumis aux 27 simulations annuelles de validations présentées dans le Tableau 3-5.

Bâtiment	Climat	Surface des capteurs
SFH30	Barcelone	Cas 1
SFH60	Zurich	Cas 2
SFH100	Stockholm	Cas 3

Tableau 3-5 Environnements des séquences annuelles de validation

3.1.2. Le processus d'entraînement et de sélection

Une fois les données et paramètres récupérés à partir des simulations de la séquence d'entraînement, le processus d'apprentissage et de sélection d'un modèle global de SSC, défini dans le CHAPITRE 2, peut être appliqué. Un modèle complet du SSC testé sera ainsi obtenu et pourra être confronté à son modèle détaillé par l'intermédiaire des simulations de validation présentées dans le paragraphe 3.1.1.

Parmi les paramètres du processus (voir paragraphe 2.3), les valeurs retenues dans cette étude sont présentées dans le Tableau 3-6.

Pas de temps du modèle	$\Delta t = 30 \text{ min}$
Nombre de réinitialisations	$N_{init} = 25$
Coefficient d'exigence sur RMSE	$\alpha_{RMSE} = 5$
Coefficient d'exigence sur ErrTot	$\alpha_{ErrTot} = 0.9$
Limite de tolérance pour le coefficient d	$d_{lim} = 0.1$

Tableau 3-6 Paramètres du processus d'entraînements et de sélection de modèle retenus pour l'étude

L'entraînement, la sélection et les comparaisons de modèles sont réalisés avec le logiciel MATLAB [MATLAB, 2008a] et avec l'aide de sa toolbox « Neural Network » [MATLAB, 2008b] pour l'application des algorithmes d'initialisation et d'optimisation des réseaux.

Pour la validation de cette démarche, le processus est réalisé plusieurs fois de suite afin d'étudier sa répétitivité.

3.1.3. Les critères de validation

Les résultats issus des simulations de validation du modèle sont confrontés aux résultats des simulations TRNSYS correspondantes. Pour chacune des N_{Simu} simulations de validation, les énergies annuelles calculées à l'aide de TRNSYS (Q_{TRNSYS}) et à l'aide du modèle « Boîte Grise » identifié ($Q_{BoiteGrise}$) sont comparées. La qualité de généralisation de ce dernier modèle est évaluée grâce à certains critères déjà utilisés dans le Chapitre 2 (voir paragraphe 2.2.2.1).

3.1.3.1. Erreur absolue moyenne de l'ensemble des résultats du modèle (MAE)

L'erreur absolue moyenne est appliquée à l'ensemble des 3 sorties du modèle étudié (l'énergie d'appoint consommée Q_{aux} , l'énergie récupérée par les capteurs Q_{coll} et l'énergie fournie aux émetteurs pour répondre aux besoins de chauffage Q_{em}) pour chaque simulation ($N_{simu} = 27$) selon l'équation (3-5)).

$$MAE = \frac{1}{3 \cdot N_{Simu}} \sum_{i=1}^{3 \cdot N_{Simu}} |Q_{TRNSYS}(i) - Q_{BoiteGrise}(i)| \quad (3-5)$$

Ce critère est donc unique pour chaque modèle et mesure la proximité de ses résultats avec ceux du modèle détaillé sous TRNSYS, sans différencier la précision des calculs pour chaque sortie du modèle. En prenant en compte l'ensemble des simulations et des sorties disponibles, le critère MAE représente en quelque sorte le « pouvoir de généralisation » global du modèle, en un seul terme.

3.1.3.2. Coefficient de corrélation statistique (R^2)

Le coefficient de corrélation statistique est appliqué à chaque sortie du modèle selon la formule exprimée par l'équation (3-6).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{Simu}} (Q_{TRNSYS}(i) - Q_{BoiteGrise}(i))^2}{\sum_{i=1}^{N_{Simu}} (Q_{TRNSYS}(i) - \bar{Q}_{TRNSYS})^2} \quad (3-6)$$

Ce coefficient mesure à quel point le modèle neuronal entraîné est proche du modèle TRNSYS pour l'estimation de chaque sortie. Plus R^2 est proche de 1, plus la relation $Q_{BoiteGrise} = Q_{TRNSYS}$ est vérifiée et donc plus la généralisation du modèle semble bonne.

3.1.3.3. Estimation des courbes caractéristiques

Il est également intéressant de comparer les deux types de modèles au niveau de la caractérisation de performances de SSC, qui est l'objectif de l'étude entreprise. On peut en effet constater la cohérence entre les courbes caractéristiques de la

CHAPITRE 3

méthode FSC obtenues selon les 2 modèles (voir paragraphe 1.1.3.3 et [Letz et al., 2009]).

L'ensemble des simulations présentées dans le paragraphe 3.1.1 permet de calculer 27 points dans le plan $[f_{sav}, FSC]$ pour chaque modèle afin de caractériser le SSC étudié à l'aide d'une courbe. Ces critères expriment l'énergie économisée par rapport à une situation de référence, dans laquelle un système basique, de rendement global $\eta_{aux,ref}$, fournirait la même quantité d'énergie pour couvrir les besoins en chauffage et en ECS. A chacune des simulations correspond donc une énergie de consommation de référence, définie par l'équation (3-7).

$$Q_{aux,ref} = \frac{Q_{sh} + Q_{dhw} + Q_{loss,ref}}{\eta_{aux,ref}} \quad (3-7)$$

Bien que les environnements soient désignés de la même manière quel que soit le type de modèle, il existe des différences entre les besoins de chauffage calculés par les modèles « Boîte Grise » et ceux calculés par les modèles TRNSYS. Ainsi, pour prendre cette différence en compte dans le calcul des performances des SSC, on distingue des besoins de chauffage Q_{sh} de référence différents selon le type de modèle. Ces besoins correspondent à ceux obtenus lors l'étude de la partie « Boîte Blanche » (voir 2.2.2.3). Les valeurs annuelles des besoins de chauffage de référence sont présentées dans le Tableau 3-7.

Climat	Bâtiment	Besoins de chauffage annuels de référence pour les modèles de type « Boîte Grise », en kWh	Besoins de chauffage annuels de référence pour les modèles TRNSYS, en kWh
Barcelone	SFH30	165	248
Barcelone	SFH60	1163	1306
Barcelone	SFH100	2823	3394
Zurich	SFH30	3954	4178
Zurich	SFH60	8410	8612
Zurich	SFH100	14034	14641
Stockholm	SFH30	6393	6544
Stockholm	SFH60	12481	12695
Stockholm	SFH100	19963	20421

Tableau 3-7 Valeurs des besoins de chauffage à prendre en compte dans le calcul de l'énergie de référence pour la détermination des coefficients f_{sav} et FSC

Parmi les différents taux d'économie d'énergie présentés dans le Chapitre 1, seul le taux d'économie d'énergie thermique $f_{sav,th}$ pourra être abordé pour l'instant. En effet :

- le modèle « Boîte Grise » ne prend pas encore en compte la consommation d'énergie électrique des appareils du système : il est donc impossible d'estimer la fraction étendue d'énergie économisée $f_{sav,ext}$;
- le calcul des énergies de pénalités pour le non-respect des températures de consigne d'ECS et d'air intérieur nécessite de connaître précisément l'évolution de

ces dernières au cours des simulations. Or pour l'instant, la température de consigne en ECS est supposée atteinte en permanence pour faciliter cette première étude de modélisation globale de SSC. De plus, l'estimation de la température intérieure nécessite une étude plus approfondie. Etant donné que l'accent est surtout mis sur la qualité d'estimation des énergies de sorties lors de la phase d'entraînement et de sélection d'un modèle neuronal, la précision sur l'évolution de T_{room} n'est pas forcément suffisante pour calculer correctement les éventuelles pénalités. Le calcul de l'indicateur de fraction solaire f_{si} n'est donc pas envisagé pour l'instant.

Le facteur de correction SC (voir paragraphe 1.1.3.3) pourrait être utilisé pour ajuster éventuellement la précision des courbes. Cependant, il ne sera pas utilisé ici pour pouvoir confronter leurs résultats aux calculs déjà réalisés dans d'autres projets et n'utilisant pas ce facteur de correction. Rappelons que Letz [Letz, 2010] a proposé des courbes caractéristiques limites définissant une zone de fonctionnement correct des SSC (voir Figure 3-5).

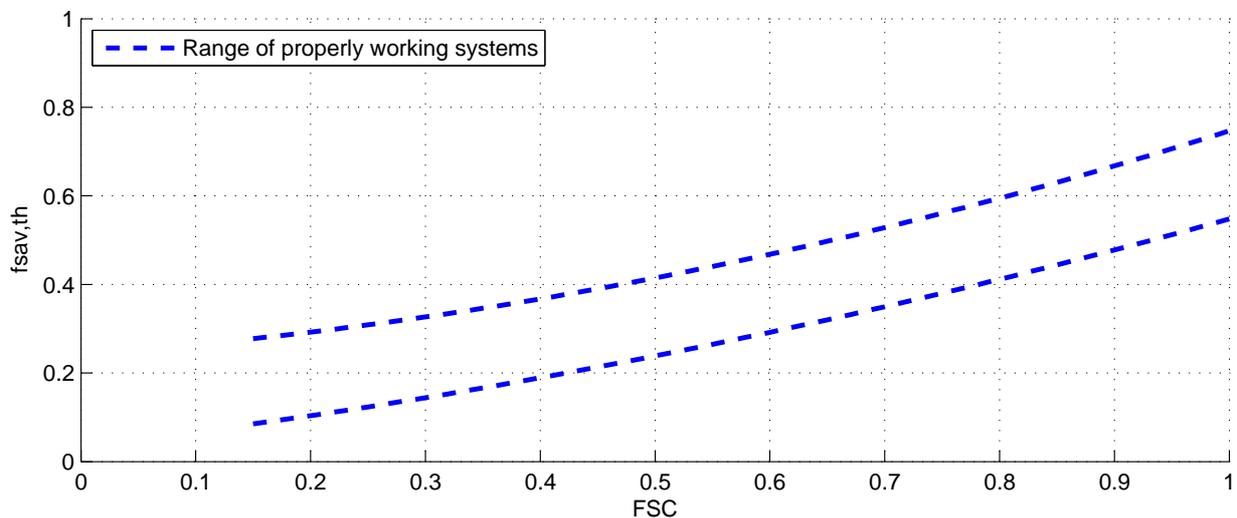


Figure 3-5 Courbes "limites" définissant la zone de fonctionnement correct de SSC

Les courbes caractérisant les SSC étudiés sont obtenues en appliquant la méthode des moindres carrés (voir paragraphe 2.3.1) sur les ensembles $[FSC, f_{sav,th}]$ obtenus par les modèles détaillés sous TRNSYS et par les modèles « Boîte Grise » identifiés, en posant comme formule de régression l'équation (3-8).

$$f_{sav,th} = a.FSC^2 + b.FSC + C \quad (3-8)$$

Les coefficients a, b et c ainsi identifiés pourront être comparés entre les deux types de modélisation.

On pourra utiliser les données de la séquence de test pour déterminer un point du plan $[FSC, f_{sav,th}]$, qui représente en quelque sorte la performance évaluée par la méthode SCSPT de manière « classique ». Il sera ainsi possible de vérifier la cohérence des résultats obtenus par 3 manières différentes (SCSPT classique, modèle « Boîte Grise » et modèle TRNSYS).

3.1.3.4. Erreur absolue moyenne sur l'estimation des besoins de chauffage par rapport aux besoins de référence (MAE_{ref})

Dans le but de se projeter dans des conditions de test réel, nous avons ajouté l'indicateur MAE_{ref} . Cet indicateur est la différence absolue moyenne entre les estimations des énergies fournies aux émetteurs par le modèle « Boîte Grise » étudié (appelée $Q_{em_BoiteGrise}$ dans l'équation (3-9) ci-dessous) et les besoins de chauffage de référence considérés (appelée Q_{em_Ref} ci-dessous et correspondant aux valeurs données dans le Tableau 3-7).

$$MAE_{ref} = \frac{1}{N_{Simu}} \sum_{i=1}^{N_{Simu}} |Q_{em_Ref}(i) - Q_{em_BoiteGrise}(i)| \quad (3-9)$$

En effet, en condition réelle de test de SSC, les résultats issus des simulations de validation ne sont pas disponibles. Les critères présentés ci-dessus ne pourront donc pas être utilisés pour juger de la bonne estimation du modèle « Boîte Grise » obtenu et choisir le modèle de réseau le plus adapté. Les seules valeurs disponibles pour servir de base de comparaison sont les besoins de chauffage de référence, dépendant du modèle de bâtiment utilisé dans la partie « Boîte Blanche » du modèle global du SSC (voir le Tableau 3-7).

Aussi, un SSC assurant correctement le chauffage du bâtiment à la température désirée pendant la phase de test « 12 jours », sera-t-il considéré comme parfaitement capable d'assurer les besoins de chauffage annuels quel que soit l'environnement. Le critère MAE_{ref} permettra au moins de constater si le modèle entraîné estime correctement les énergies Q_{em} lors des différentes simulations. L'utilisation de ce critère conduira à un tri parmi les différents modèles obtenus (comme dans le paragraphe 0) afin d'écarter les modèles dont les résultats paraîtraient aberrants.

3.2. Modèles détaillés de SSC et exploitations

Les modèles détaillés de SSC utilisés ici pour valider la nouvelle approche ont été réalisés sous TRNSYS. Ils ont déjà été utilisés lors de projets français et européens, notamment pour valider la méthode SCSPT.

3.2.1. SSC1

Le modèle de SSC n°1 est celui utilisé comme système de référence lors de la Tâche 32 de l'IEA [Heimrath et Haller, 2007]. Il a également été utilisé par [Nowag, 2007] pour mettre au point l'algorithme de sélection des 12 jours de test caractéristique d'un climat au choix de la méthode SCSPT. Le modèle est disponible sur le site internet de la tâche 32¹⁷. Son schéma hydraulique est représenté par la Figure 3-6.

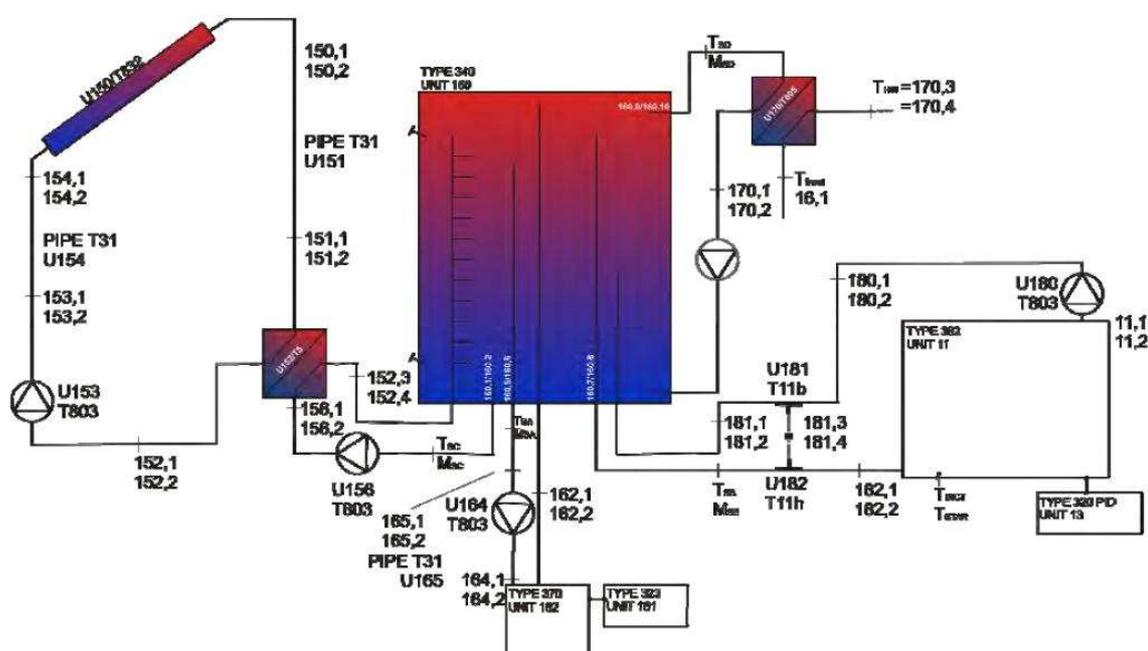


Figure 3-6 Schéma hydraulique du SSC1. Source : IEA

Selon la classification Combisol (voir paragraphe 1.1.1.3), ce système est du type C2, à la différence près que l'énergie solaire est également apportée via un échangeur externe. Les particularités de ce système sont :

- Stockage de la chaleur solaire via une canne de stratification dans le ballon ;
- Transfert de la chaleur pour les besoins en ECS via un échangeur externe au ballon de stockage ;
- Transfert de la chaleur solaire via un échangeur externe au ballon de stockage.

Le modèle TRNSYS de ce SSC présente quelques particularités :

¹⁷ Voir *Complete Data Set of the Task 32 Reference System for TRNSYS* à l'adresse : <http://www.iea-shc.org/task32/publications/index.html>

CHAPITRE 3

- Les pertes des circuits hydrauliques ne sont prises en compte que pour la boucle capteur et la boucle d'appoint. Pour cette dernière, seul le tuyau froid est modélisé. Le calcul des coefficients globaux de pertes (UA) utilise la formule générale définie par l'équation (3-10). Elle se base sur une résistance thermique R , (en $m^2.K.W^{-1}$), exprimée en fonction de paramètres géométriques (diamètres d pris à plusieurs niveaux) et thermiques (conductivité thermique λ et coefficient d'échange superficiel α) des canalisations et de leur isolation.

$$\left\{ \begin{array}{l} (UA)_{loop} = \frac{1}{R} \cdot \pi \cdot d_{inside} \cdot l_{pipe} \\ R = \frac{d_{inside} \cdot \ln\left(\frac{d_{outside}}{d_{inside}}\right)}{2 \cdot \lambda_{pipe}} + \frac{d_{inside} \cdot \ln\left(\frac{d_{insulation}}{d_{outside}}\right)}{2 \cdot \lambda_{insulation}} + \frac{d_{inside}}{\alpha_{outside} \cdot d_{insulation}} + \frac{1}{\alpha_{inside}} \end{array} \right. \quad (3-10)$$

- Les paramètres de la boucle solaire dépendent de la surface des capteurs : les diamètres interne et externe des tubes (respectivement $d_{coll,loop,inside}$ et $d_{coll,loop,outside}$) et diamètre de l'isolation $d_{coll,loop,insulation}$ sont définis par les équations (3-11). Le débit nominal du fluide du circuit capteur $\dot{m}_{coll,nom}$ est proportionnel à la surface des capteurs, avec un débit spécifique de $15 \text{ kg.hr}^{-1} \cdot m^{-2}$ ici. Les variations de diamètres ont pour but de conserver une certaine vitesse de fluide dans le circuit (environ $0,6 \text{ m.s}^{-1}$). Le changement d'épaisseur d'isolation permet de rester conforme aux exigences de la norme EN12976-2 [EN12976-2, 2006].

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{coll,loop,inside} = \frac{0.8 \sqrt{\dot{m}_{coll,nom}}}{1000} \\ d_{coll,loop,outside} = d_{coll,loop,inside} + 0.002 \\ d_{coll,loop,insulation} = \max(2 \cdot d_{coll,loop,inside} + d_{coll,loop,outside}; d_{coll,loop,outside} + 0.04) \end{array} \right. \quad (3-11)$$

Le volume du ballon de stockage est de 1000L pour ce système. Les surfaces de capteurs utilisées pour les simulations de validation sont présentées dans le Tableau 3-8.

Capteur	Surface [m ²]	Coefficient de dimensionnement [L/m ²]
Surface 1	20m ²	50
Surface 2	14m ²	71
Surface 3	8m ²	125

Tableau 3-8 Surfaces de capteur sélectionnées pour le SSC1

Les paramètres caractéristiques de ce système utilisés dans la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC sont présentés dans le Tableau 3-9.

Capteur	Stockage	Appoint
$\beta = 45^\circ$	$C_{store} = 4,18.10^6 \text{ J.K}^{-1}$	$Type = 101$
$\gamma = 0^\circ$	$(UA)_{store} = 5 \text{ W.K}^{-1}$	$Regul = 1$
$alb = 0,2$	$T_{amb,store} = 15^\circ\text{C}$	$Ventil = 1$
$F'(\tau\alpha)_{en} = 0,8$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 10.10^3 \text{ W}$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 10.10^3 \text{ W}$
$K_{\theta l} = 0,9$	$T_{aux,hot,nom} = 80^\circ\text{C}$	$T_{amb,aux} = 15^\circ\text{C}$
$b_0 = 0,2$	$T_{aux,cold,nom} = 60^\circ\text{C}$	$T_{em,in,d}^* = 40^\circ\text{C}$
$c_1 = 3,50 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$T_{set,dhw} = 45^\circ\text{C}$	$T_{a,d}^* = -10^\circ\text{C}$
$c_2 = 0,015 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-2}$	$(UA)_{aux,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	$T_{set,room} = 20^\circ\text{C}$
$c_3 = 0 \text{ W.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{aux,loop,cold} = 1,34 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_4 = 0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,hot}^* = 2,58 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_5 = 7000 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,cold}^* = 2,58 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_6 = 0 \text{ s.m}^{-1}$	$(UA)_{em,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{em,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	

Tableau 3-9 Paramètres du SSC1 pour le modèle "Boîte Grise" (les valeurs des paramètres marqués * changent en fonction de l'environnement et correspondent ici à l'environnement d'entraînement)

Les paramètres du modèle simplifié de la chaudière d'appoint ne sont pas évidents à identifier à partir du paramétrage adopté dans TRNSYS. Rien ne permet de dire a priori si la chaudière est à condensation ou à basse température. Une recherche rapide sur le type de chaudière minimisant les erreurs d'estimation de la température moyenne de ballon de stockage a permis d'identifier le paramètre *Type* correspondant.

La Figure 3-7 permet d'évaluer la qualité de l'estimation d'état avec ce jeu de paramètres lors de la phase d'entraînement. Sur chaque graphique est notée l'erreur type (*RMSE*) définie comme dans le paragraphe 2.2.2.1.

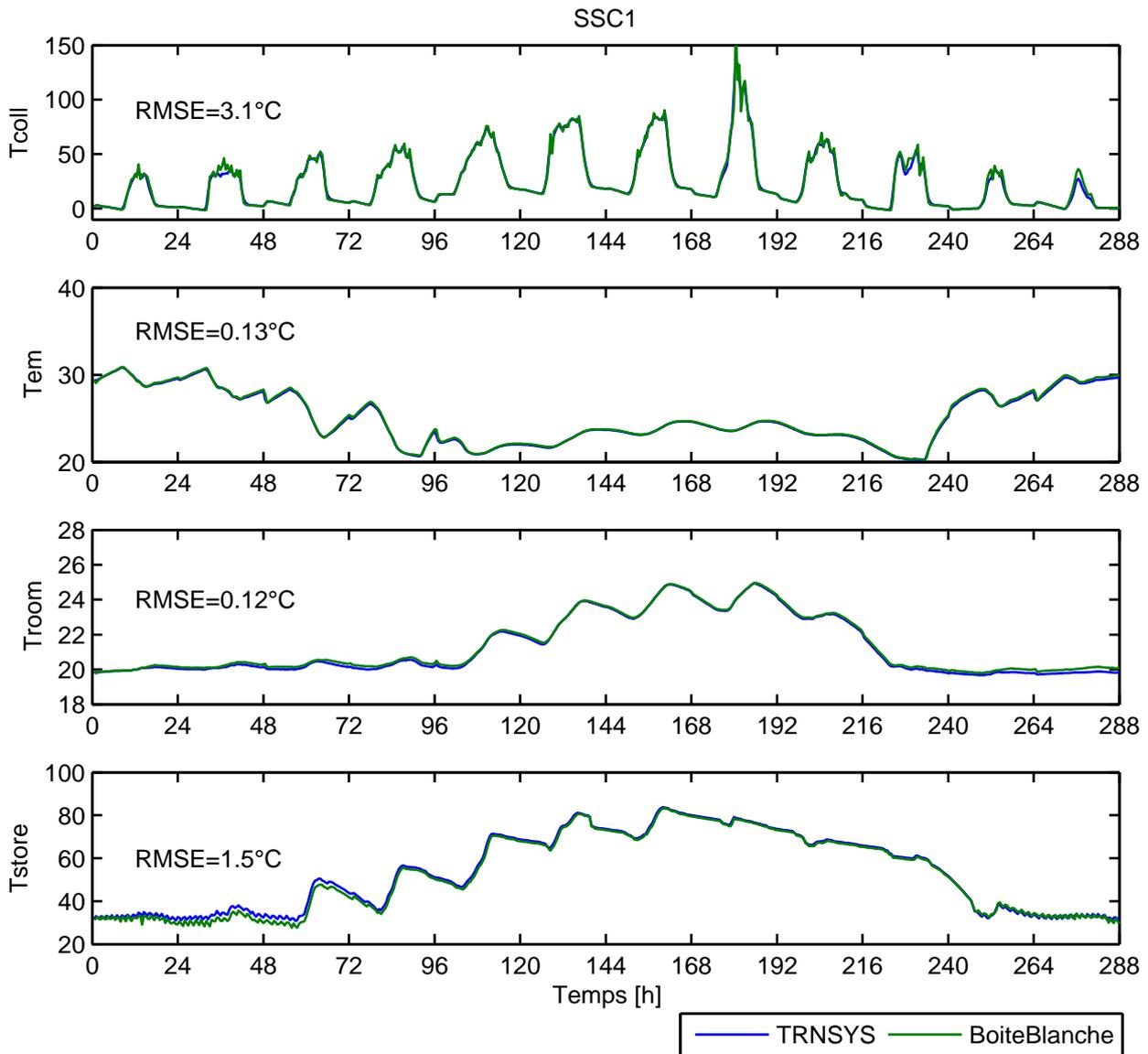


Figure 3-7 Comparaison des états du SSC1 pendant la séquence d'entraînement avec leur estimation par la « Boîte Blanche » du modèle global de SSC

L'estimation faite par la partie « Boîte Blanche » concernant les températures d'émetteur et d'air intérieur est très peu différente des résultats de calculs avec TRNSYS. Le léger écart vient de l'estimation du rayonnement diffus simplifié dans le modèle global de SSC. Ceci affecte les calculs d'apports solaires passifs mais ils n'ont pas une grande influence sur l'évolution de ces températures.

Pour les mêmes raisons (estimation simplifiée du rayonnement diffus), la température moyenne des capteurs est surestimée dans le modèle global par rapport aux données TRNSYS, à certains moments, notamment lors de journées couvertes. Les évolutions restent néanmoins très proches.

L'évolution de la température moyenne du ballon est également très similaire dans les deux cas. Le jeu de paramètres déterminé pour le modèle de chaudière et l'estimation de pertes des circuits traduisent correctement la chaleur stockée pendant la simulation d'entraînement. La température du ballon est par moment légèrement plus

basse pour le modèle « Boîte Blanche » mais l'écart de température entre le début et la fin de la séquence est sensiblement le même pour les deux types de modèles.

A partir de l'ensemble des données de la séquence, les vecteurs de régression appliqués aux bornes des réseaux de neurones pour entraînement sont présentés sur la Figure 3-8.

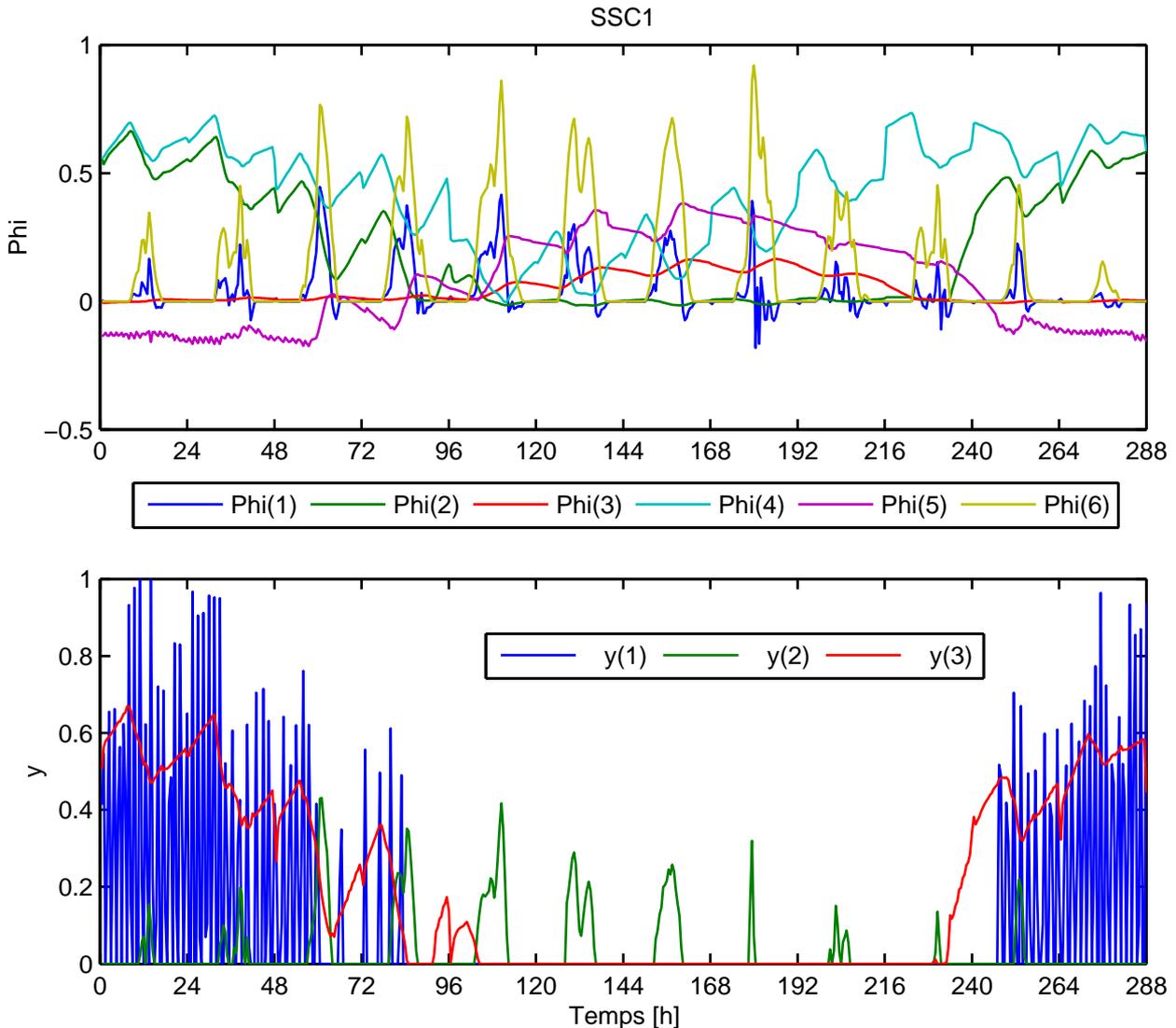


Figure 3-8 Evolution des vecteurs de régression entrées et sorties au cours de la séquence d'apprentissage du SSC1

Les variables sont correctement bornées. Aucune d'entre elles ne semble sous-estimée ou surestimée, ce qui garantit une prise en compte équitable de toutes les entrées et sorties des réseaux. Le fonctionnement de la chaudière, avec ce système, conduit à un signal de sortie $y(2)$ très saccadé, ce qui peut poser d'éventuelles difficultés d'apprentissage.

3.2.2. SSC2

Le SSC2 est un système commercialisé principalement en France et en Allemagne. Il a été largement testé au travers de projets comme EvaluationSSC [Albaric et al., 2009] sur le plan français et Combisol [Mette et al., 2010] sur le plan européen. Ces deux projets ont contribué à la validation de la méthode SCSPT. Des résultats expérimentaux et de suivis in-situ sont déjà disponibles. Son schéma hydraulique est représenté par la Figure 3-9.

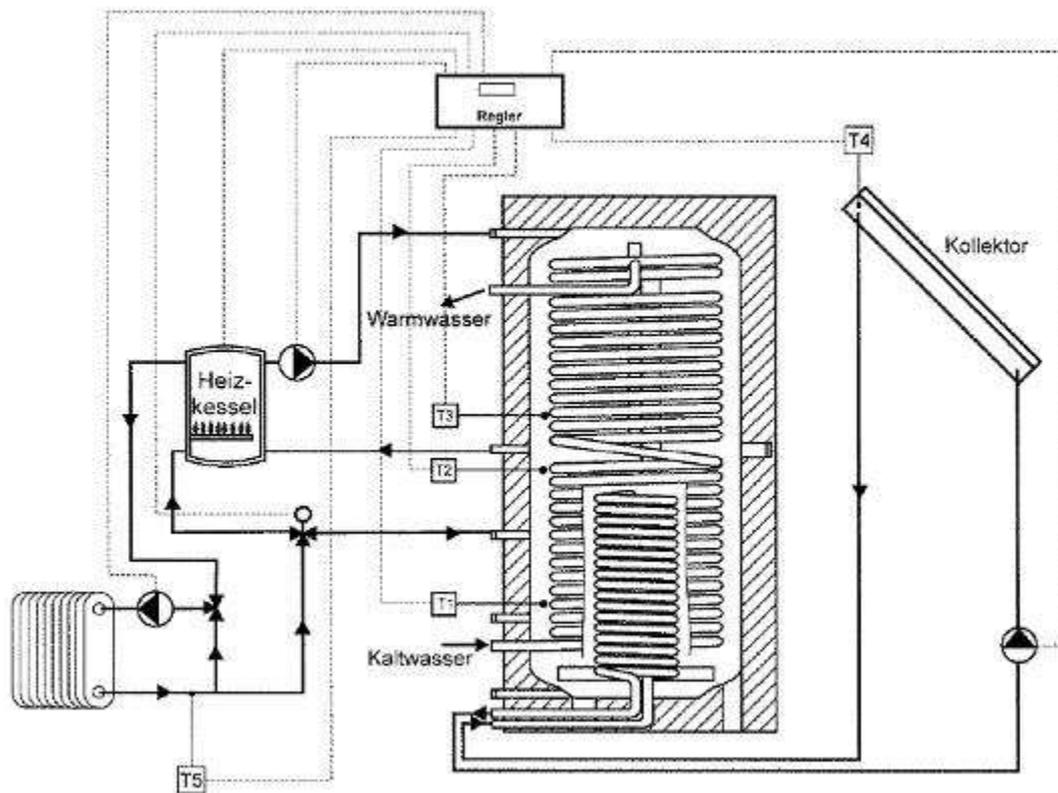


Figure 3-9 Schéma hydraulique du SSC2

Selon la classification Combisol (voir paragraphe 1.1.1.3), ce système est du type B1. Les particularités de ce système sont :

- Transfert de la chaleur solaire via un échangeur interne au ballon de stockage;
- Transfert de la chaleur pour l'ECS via un échangeur interne au ballon de stockage;
- Augmentation de la température de retour de chauffage par un piquage direct sur le ballon de stockage.

Le modèle détaillé de ce système a été réalisé à partir de son schéma hydraulique (Figure 3-9) et de sa documentation technique (notamment pour la programmation des différentes régulations). Les paramètres du ballon de stockage, spécifiques au Type 340 sous TRNSYS, ont été identifiés par des tests selon la norme EN 12977-3

par le centre d'essai TZS de l'institut ITW¹⁸ de l'Université de Stuttgart. Aucune perte thermique de circuit n'est considérée dans ce modèle.

Le volume du ballon de stockage est de 723L pour ce système. Les surfaces des capteurs utilisées pour les simulations de validation sont présentées dans le Tableau 3-10.

Capteur	Surface [m ²]	Coefficient de dimensionnement [L/m ²]
Surface 1	14	52
Surface 2	10	72
Surface 3	6	121

Tableau 3-10 Surfaces de capteur sélectionnées pour le SSC2

Les autres paramètres caractéristiques de ce système utilisés dans la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC sont présentés dans le Tableau 3-11.

Capteur	Stockage	Appoint
$\beta = 45^\circ$	$C_{store} = 3,02 \cdot 10^6 \text{ J.K}^{-1}$	$Type = 102$
$\gamma = 0^\circ$	$(UA)_{store} = 2.82 \text{ W.K}^{-1}$	$Regul = 3$
$alb = 0,2$	$T_{amb,store} = 15^\circ\text{C}$	$Ventil = 1$
$F'(\tau\alpha)_{en} = 0.77$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24 \cdot 10^3 \text{ W}$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24 \cdot 10^3 \text{ W}$
$K_{\theta l} = 0,96$	$T_{aux,hot,nom} = 80^\circ\text{C}$	$T_{amb,aux} = 15^\circ\text{C}$
$b_0 = 0,18$	$T_{aux,cold,nom} = 60^\circ\text{C}$	$T_{em,in,d}^* = 40^\circ\text{C}$
$c_1 = 3,478 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$T_{set,dhw} = 45^\circ\text{C}$	$T_{a,d}^* = -10^\circ\text{C}$
$c_2 = 0,015 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-2}$	$(UA)_{aux,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	$T_{set,room} = 20^\circ\text{C}$
$c_3 = 0 \text{ W.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{aux,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_4 = 0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_5 = 7422 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_6 = 0 \text{ s.m}^{-1}$	$(UA)_{em,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{em,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	

Tableau 3-11 Paramètres du SSC2 pour le modèle "Boîte Grise" (les valeurs des paramètres marqués * changent en fonction de l'environnement et correspondent ici à l'environnement d'entraînement)

Comme pour le SSC1 (voir paragraphe 3.2.1), on évalue tout d'abord la qualité de l'estimation d'état avec ce jeu de paramètres lors de la phase d'entraînement (Figure 3-10).

¹⁸ <http://www.itw.uni-stuttgart.de>

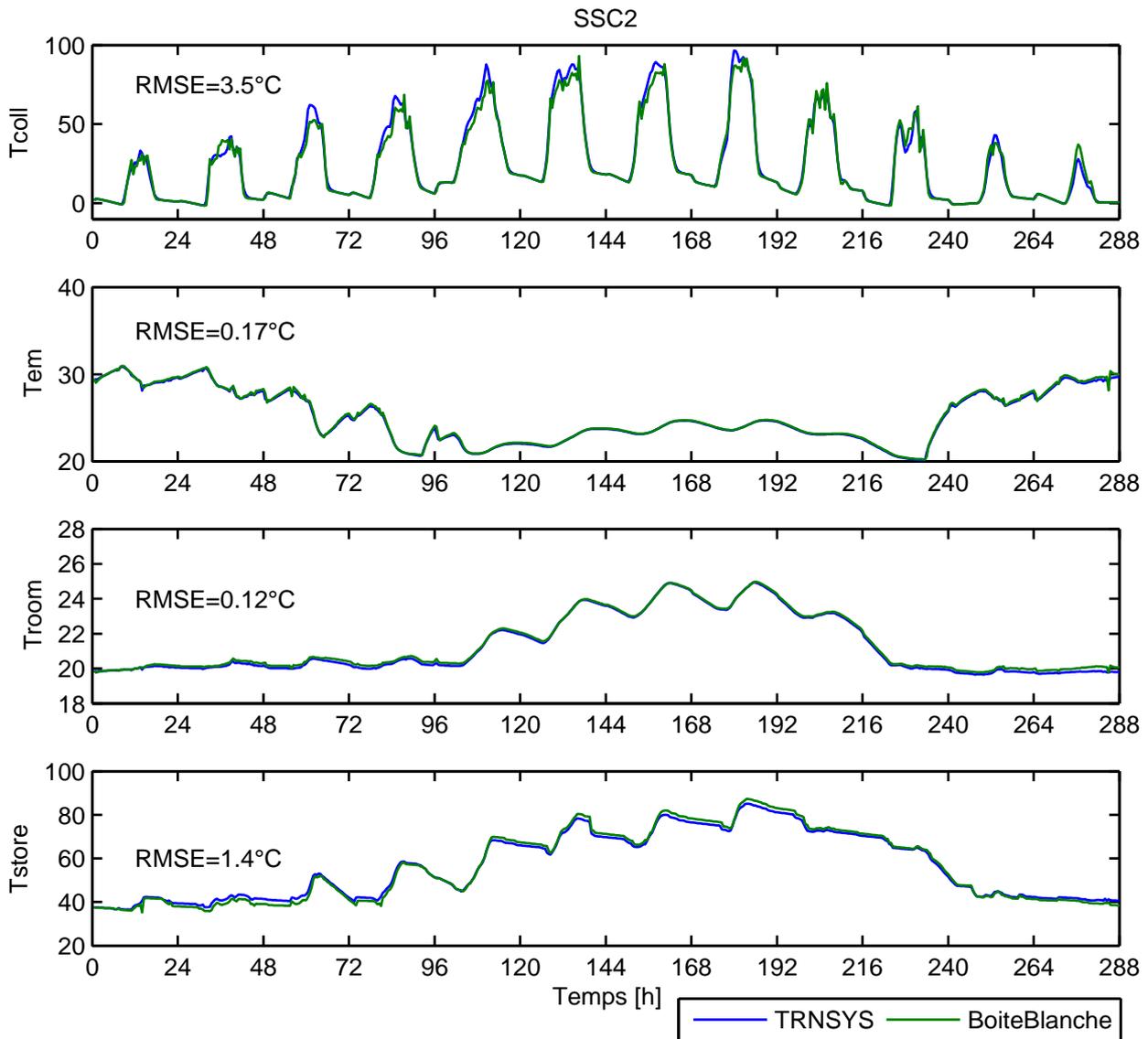


Figure 3-10 Comparaison des états du SSC2 pendant la séquence d'entraînement avec leur estimation par la « Boîte Blanche » du modèle global de SSC

Les remarques faites sur l'estimation des états du SSC1 lors de la séquence d'entraînement sont également valables ici. La principale différence concerne l'estimation de la température moyenne du ballon de stockage T_{store} . L'écart augmente légèrement à la fin de la séquence pour atteindre environ 2K. Le bilan énergétique du stockage sur la simulation d'entraînement sera donc légèrement différent mais devrait fournir une information correcte sur la gestion du stock de chaleur.

A partir de l'ensemble des données de la séquence, les vecteurs de régression appliqués aux bornes des réseaux de neurones pour entraînement sont présentés sur la Figure 3-11.

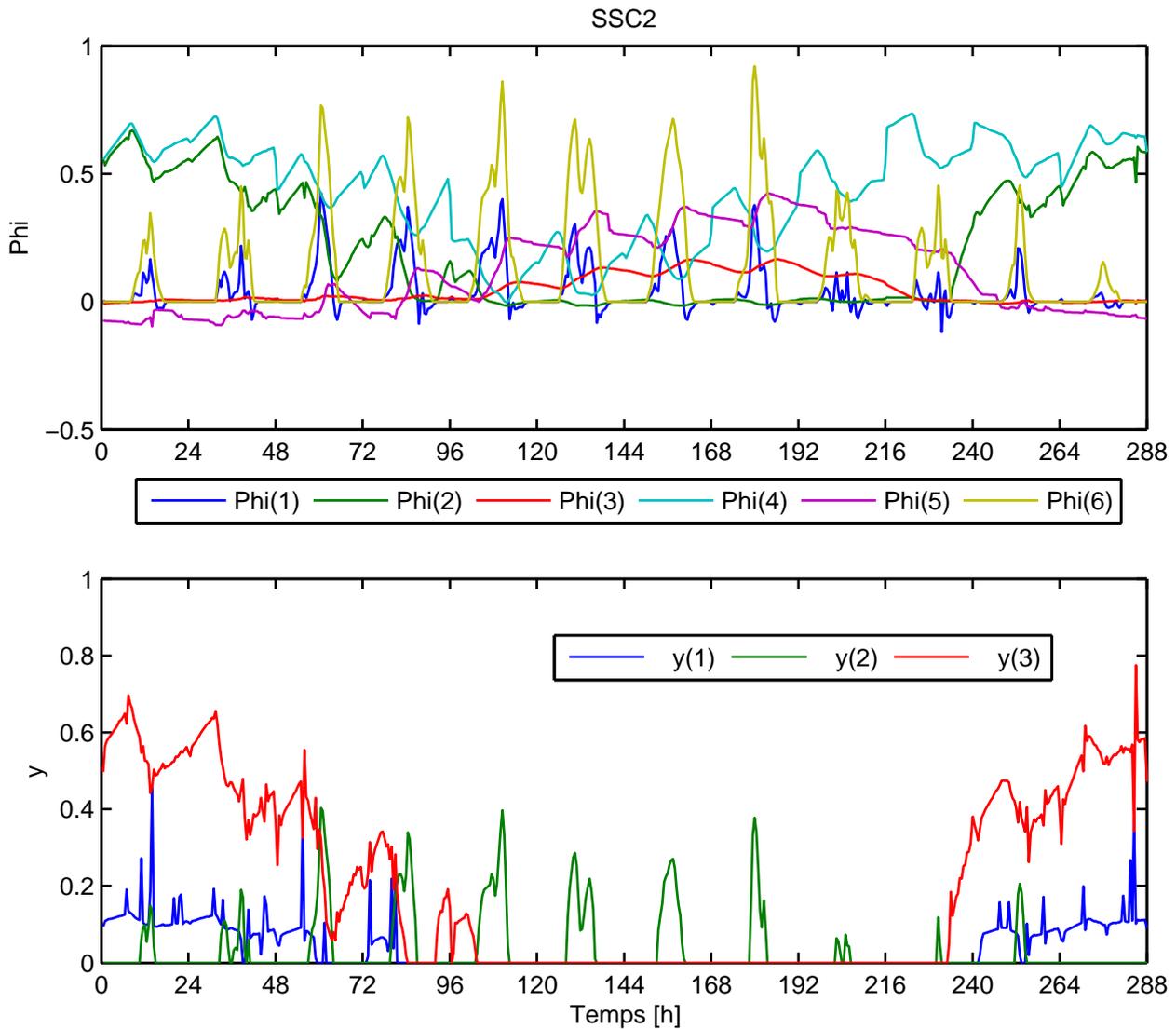


Figure 3-11 Evolution des vecteurs de régression entrées et sorties au cours de la séquence d'apprentissage du SSC2

Encore une fois, les remarques faites sur les vecteurs de régression venant de la séquence d'apprentissage du SSC1 sont valables ici. On observe cependant que le fonctionnement de la chaudière avec ce système conduit à des signaux relativement lisses sur la totalité de la séquence, ce qui devrait faciliter l'apprentissage.

3.2.3. SSC3

Le SSC3 est un système commercialisé en France. Il a été modélisé lors du projet EvaluationSSC [Albaric et al., 2009] pour mettre au point et valider la méthode SCSPT. Son schéma hydraulique est représenté par la Figure 3-12.

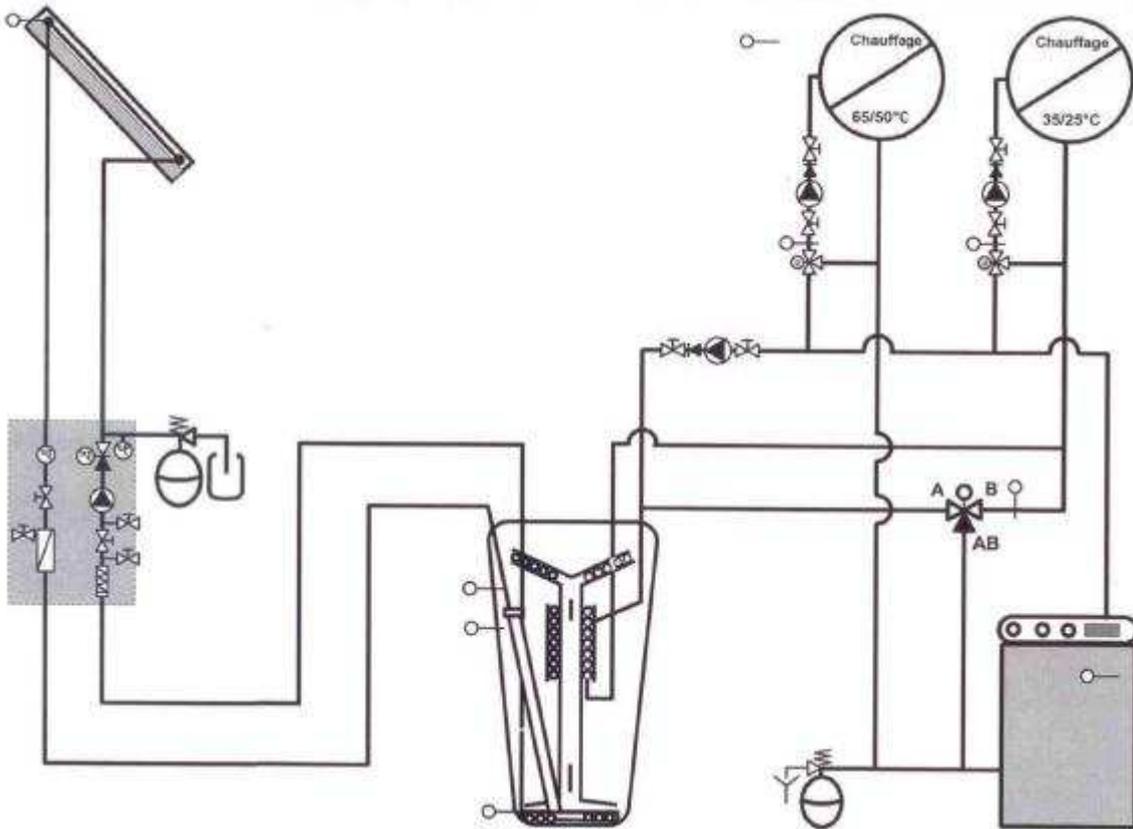


Figure 3-12 Schéma hydraulique du SSC3

Selon le classement Combisol (voir paragraphe 1.1.1.3), ce système est du type B1, à la différence près que l'eau de retour des radiateurs est préchauffée par un échangeur dans le ballon. Les particularités de ce système sont

- Stockage hydraulique sans piquage direct;
- Transfert de la chaleur solaire via un échangeur interne au ballon de stockage, couplé à une canne de stratification;
- Transfert de chaleur à double sens via un seul échangeur à la fois pour le chauffage de la partie haute du ballon par la chaudière et pour l'augmentation de la température de l'eau de retour des émetteurs de chaleur.

Le modèle détaillé de ce système a été réalisé à partir de son schéma hydraulique (Figure 3-9) et de sa documentation technique. Les principaux paramètres du ballon de stockage sont fournis avec la documentation. Ses paramètres plus spécifiques au Type 340 sous TRNSYS (notamment ceux définissant les performances des échangeurs), sont grossièrement estimés à partir de valeurs usuelles. Le même modèle de chaudière que celui du SSC2 est utilisé. Aucune perte de circuit n'est considérée dans ce modèle.

Le volume du ballon de stockage est de 560L pour ce système. Les surfaces des capteurs utilisées pour les simulations de validation sont présentées dans le Tableau 3-12.

Capteur	Surface [m ²]	Coefficient de dimensionnement [L/m ²]
Surface 1	11	51
Surface 2	8	70
Surface 3	5	112

Tableau 3-12 Surfaces de capteur sélectionnées pour le SSC3

Les autres paramètres caractéristiques de ce système utilisés dans la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC sont présentés dans le Tableau 3-13.

Capteur	Stockage	Appoint
$\beta = 45^\circ$	$C_{store} = 2,34.10^6 \text{ J.K}^{-1}$	$Type = 102$
$\gamma = 0^\circ$	$(UA)_{store} = 2.91 \text{ W.K}^{-1}$	$Regul = 1$
$alb = 0,2$	$T_{amb,store} = 15^\circ\text{C}$	$Ventil = 1$
$F'(\tau\alpha)_{en} = 0.804$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24.10^3 \text{ W}$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24.10^3 \text{ W}$
$K_{\theta l} = 0,96$	$T_{aux,hot,nom} = 80^\circ\text{C}$	$T_{amb,aux} = 15^\circ\text{C}$
$b_0 = 0,18$	$T_{aux,cold,nom} = 60^\circ\text{C}$	$T_{em,in,d}^* = 40^\circ\text{C}$
$c_1 = 3,93 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$T_{set,dhw} = 45^\circ\text{C}$	$T_{a,d}^* = -10^\circ\text{C}$
$c_2 = 0,0067 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-2}$	$(UA)_{aux,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	$T_{set,room} = 20^\circ\text{C}$
$c_3 = 0 \text{ W.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{aux,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_4 = 0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_5 = 6700 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_6 = 0 \text{ s.m}^{-1}$	$(UA)_{em,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{em,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	

Tableau 3-13 Paramètres du SSC3 pour son modèle "Boîte Grise" (les valeurs des paramètres marqués * changent en fonction de l'environnement et correspondent ici à l'environnement d'entraînement)

La Figure 3-13 permet d'évaluer la qualité de l'estimation d'état avec ce jeu de paramètre lors de la phase d'entraînement.

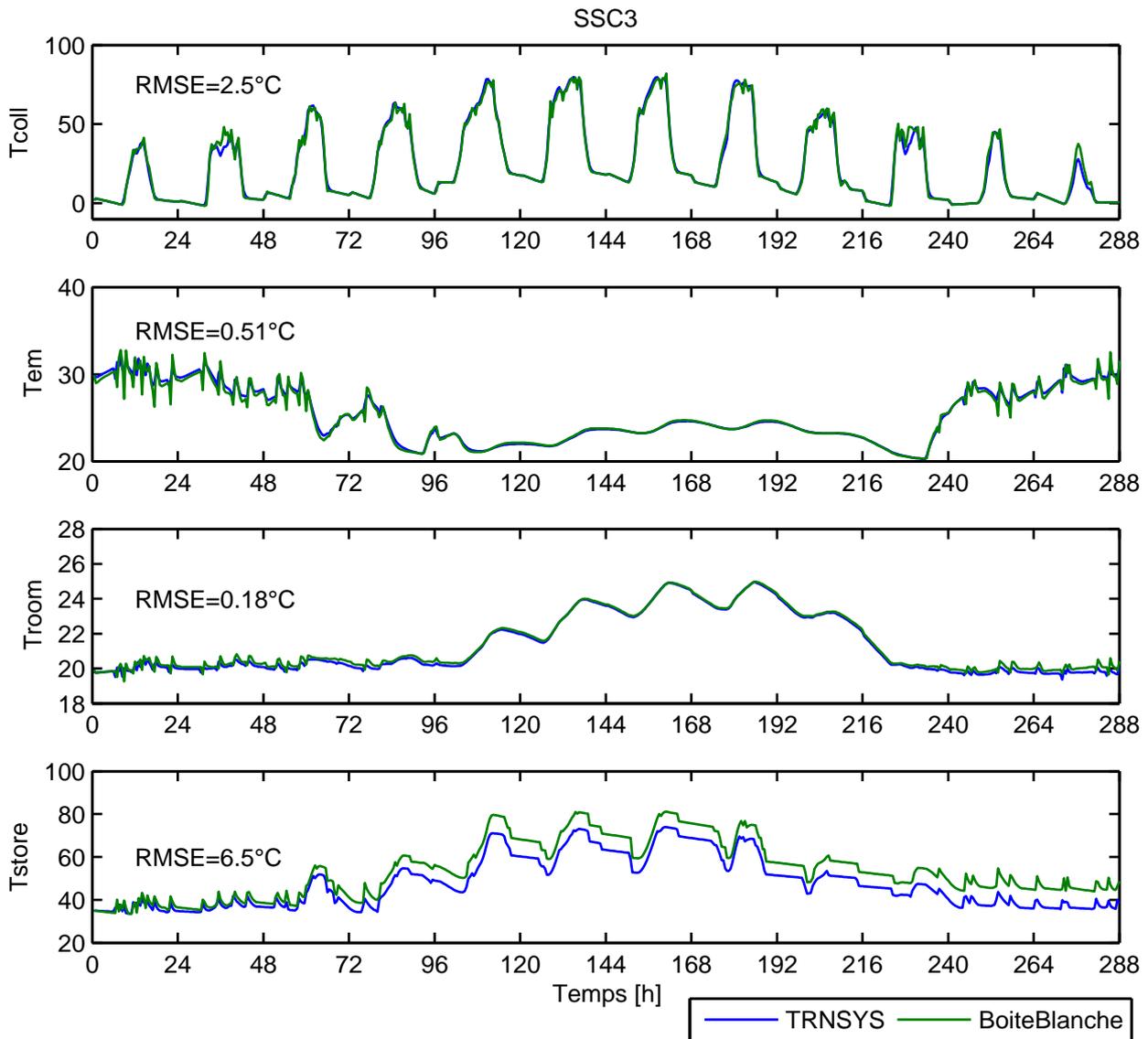


Figure 3-13 Comparaison des états du SSC3 pendant la séquence d'entraînement avec leur estimation par la « Boîte Blanche » du modèle global de SSC

Comme pour les deux autres SSC, l'estimation des températures T_{coll} , T_{em} et T_{room} est très satisfaisante.

Par contre, la température moyenne du ballon du stockage est largement surestimée. L'écart augmente au fur et à mesure de la simulation et atteint presque 12K. Ce phénomène provient du fonctionnement de la chaudière, combiné aux défauts de son modèle simplifié : pendant cette séquence la chaudière a fréquemment des périodes d'alternance rapides entre pleines charges et charges plus basses ; or à chacun de ces « pics », l'estimation de l'énergie fournie par la chaudière n'est pas précise (voir paragraphe 2.2.2.4), ce qui augmente petit à petit l'écart entre les estimations de la température du ballon.

Le bilan énergétique du stockage sur la simulation d'entraînement est donc très différent. Il faut donc s'attendre à ce que les modèles entraînés aient tendance à

« surcharger » le ballon. Les réseaux de neurones devront être sélectionnés de manière à ce qu'ils arrivent à gérer correctement ce défaut.

La Figure 3-11 représente l'évolution des vecteurs de régression pour l'entraînement des réseaux de neurones, obtenus à partir de l'ensemble des données de la séquence.

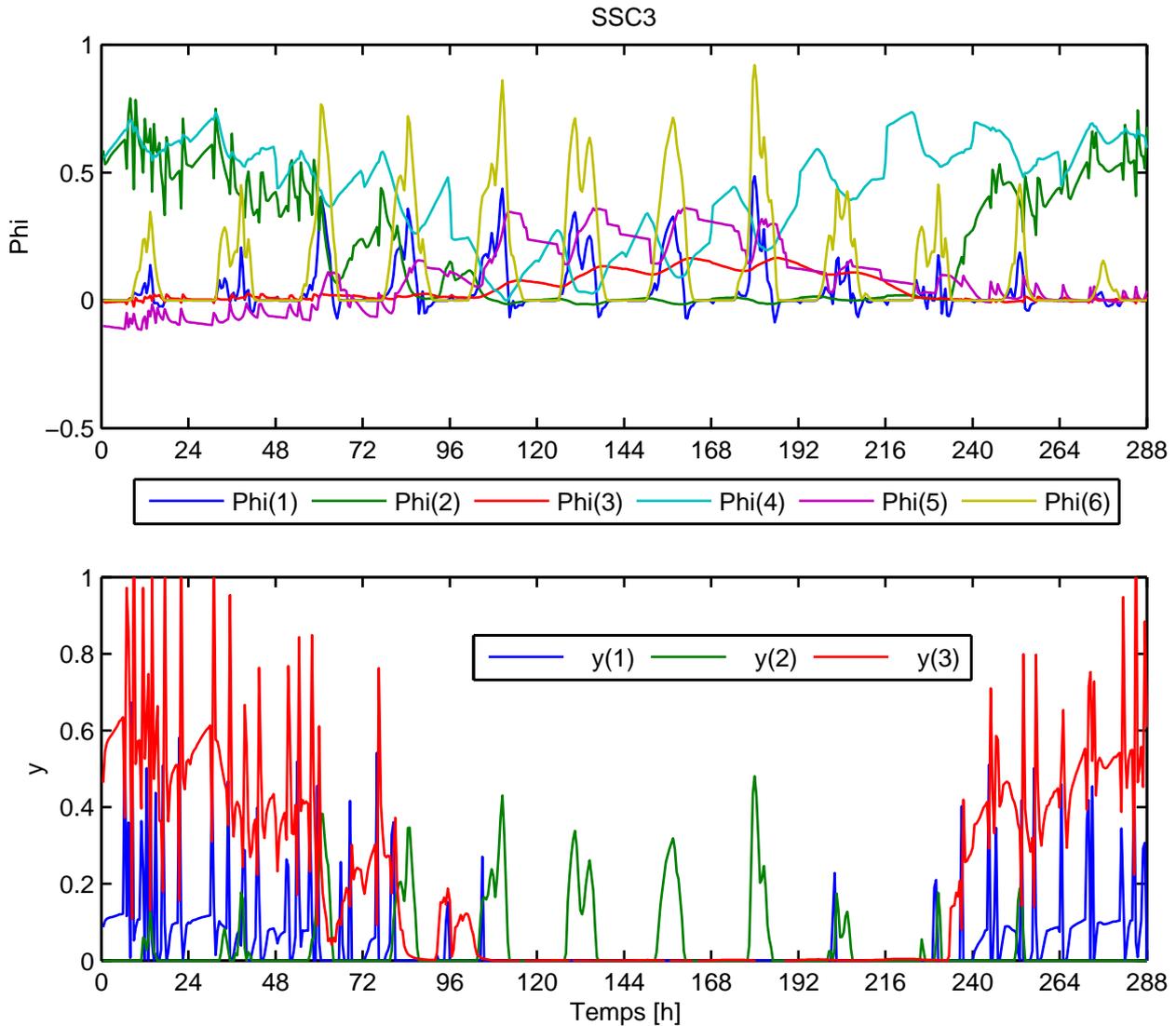


Figure 3-14 Evolution des vecteurs de régression entrées et sorties au cours de la séquence d'apprentissage du SSC2

Les remarques faites sur les vecteurs de régression venant de la séquence d'apprentissage du SSC1 sont également valables ici.

3.3. Résultats et commentaires

Pour chaque modèle détaillé de SSC à tester, la procédure d'entraînement est lancée au moins 50 fois de suite afin d'étudier sa répétitivité. Pour plus de clarté, ne sont présentés ici que les résultats les plus représentatifs.

3.3.1. Observations et analyse des séries de procédures

Comme le montrent les figures ci-dessous (Figure 3-15, Figure 3-16 et Figure 3-17), le premier point remarquable est que la procédure d'entraînement et de sélection de modèle « Boîte Grise » n'est pas répétable.

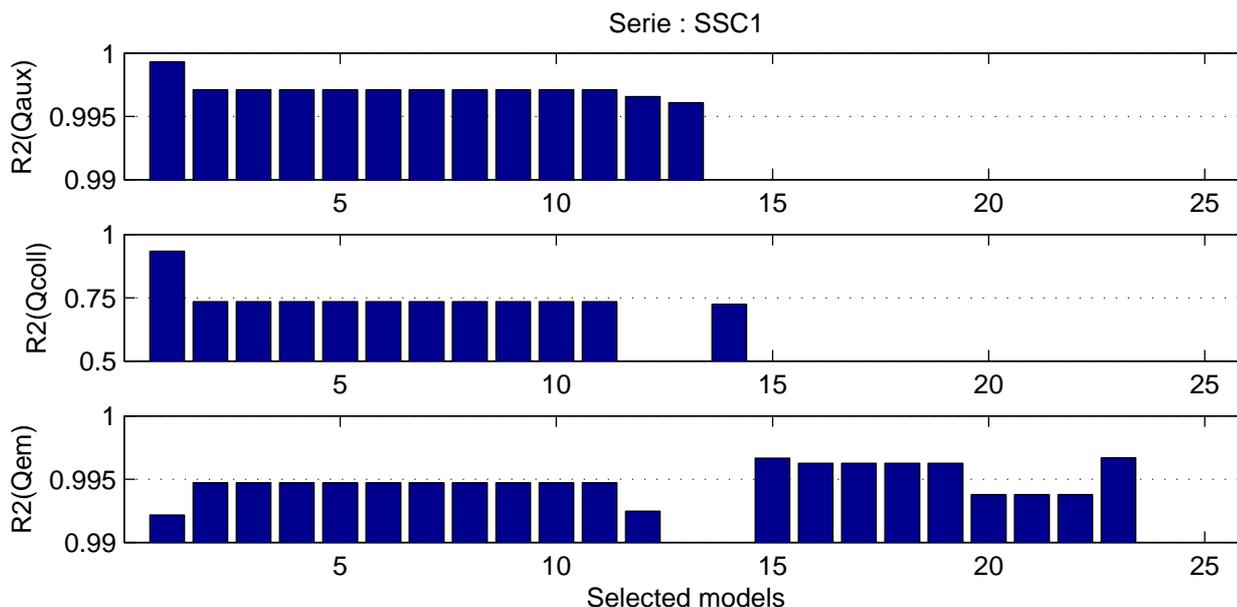


Figure 3-15 Coefficients des corrélations statistiques obtenues pour les 3 sorties des 25 premiers modèles "Boîte Grises" sélectionnés pour représenter le SSC1

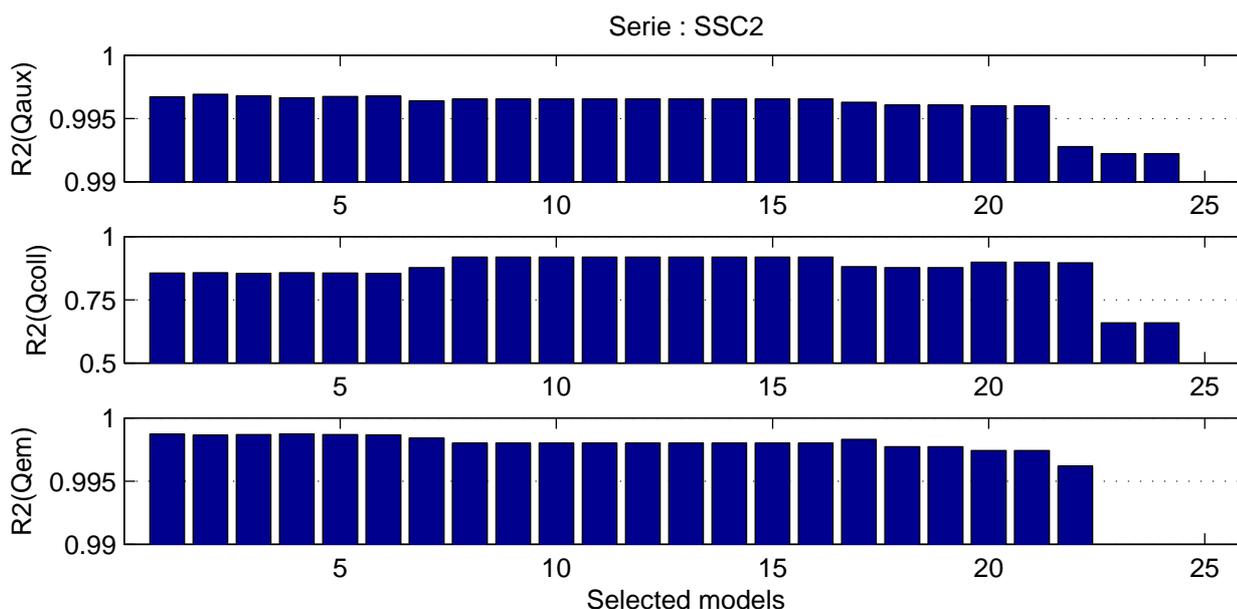


Figure 3-16 Coefficients des corrélations statistiques obtenues pour les 3 sorties des 25 premiers modèles "Boîte Grises" sélectionnés pour représenter le SSC2

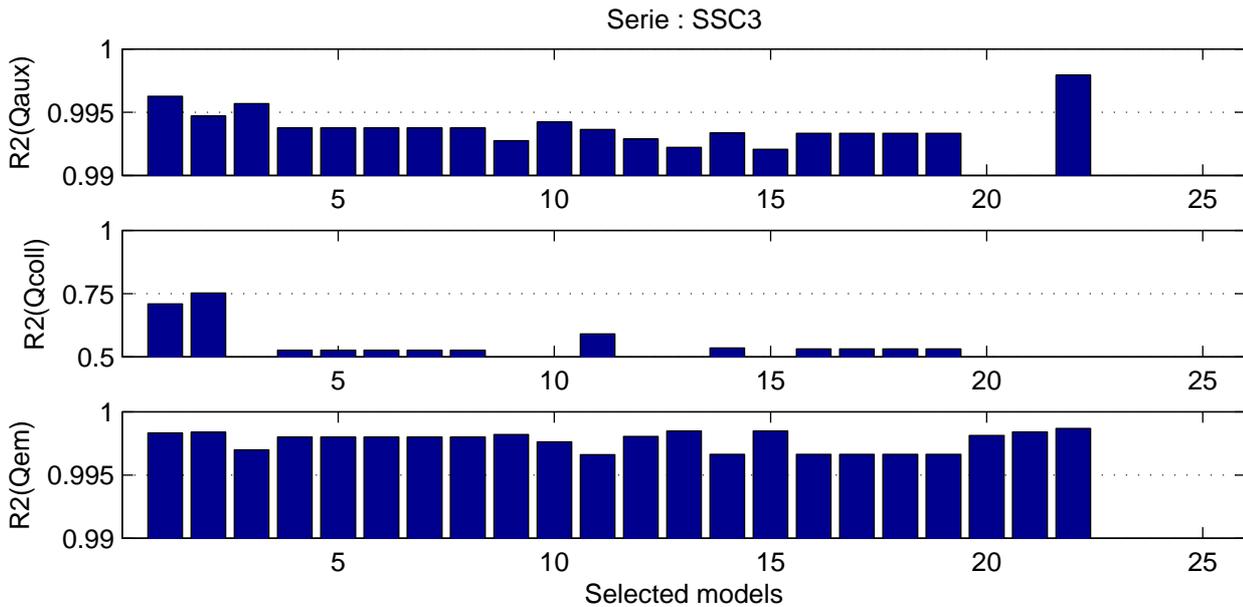


Figure 3-17 Coefficients des corrélations statistiques obtenues pour les 3 sorties des 25 premiers modèles "Boîte Grises" sélectionnés pour représenter le SSC3

Les figures ci-dessus représentent les coefficients de corrélations statistiques (R^2) obtenues pour les trois sorties (Q_{aux} , Q_{coll} et Q_{em}) des 25 premiers modèles entraînés et sélectionnés pour chacun des systèmes. Les modèles sont triés par ordre croissant d'erreur absolue moyenne (MAE , voir paragraphe 3.1.3.1) pour plus de visibilité.

Les modèles sélectionnés ne sont même pas de complexités identiques comme le montrent les figures ci-dessous (Figure 3-18, Figure 3-19 et Figure 3-20).

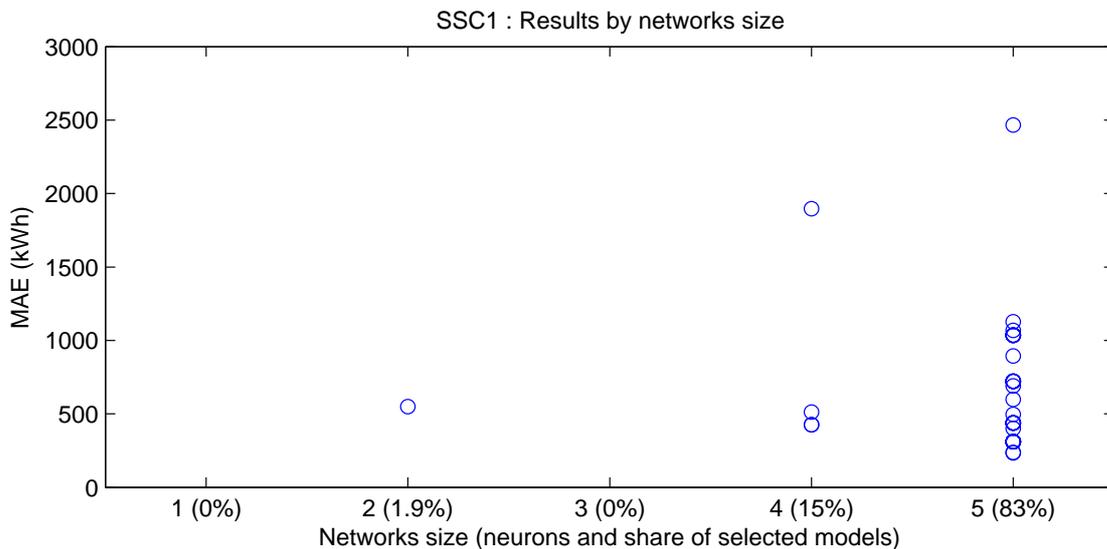


Figure 3-18 Répartition des erreurs absolues moyennes des modèles identifiés pour le SSC1 en fonction de la taille de leur réseau de neurones.

CHAPITRE 3

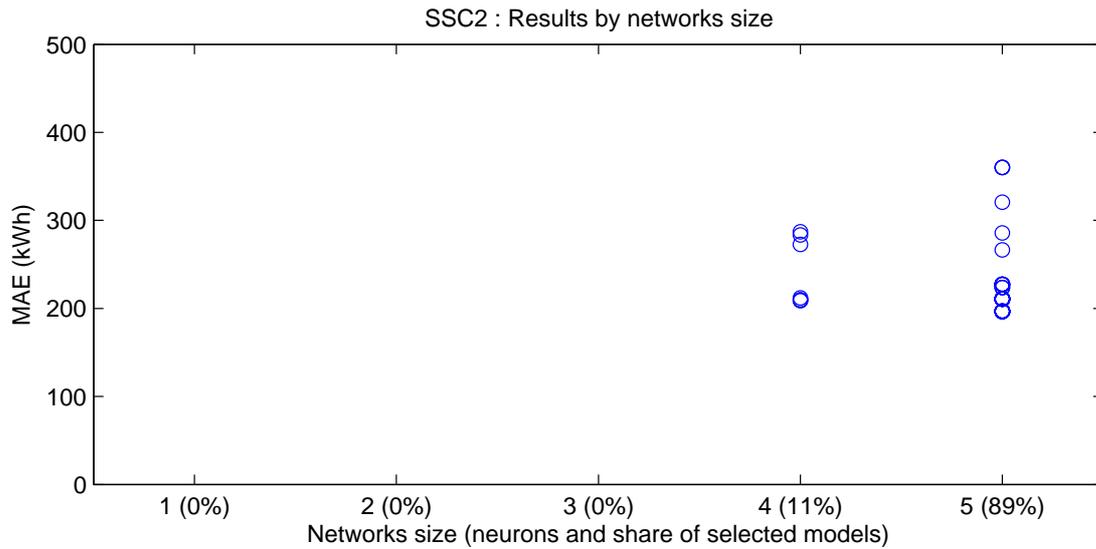


Figure 3-19 Répartition des erreurs absolue moyennes des modèles identifiés pour le SSC2 en fonction de la taille de leur réseau de neurones.

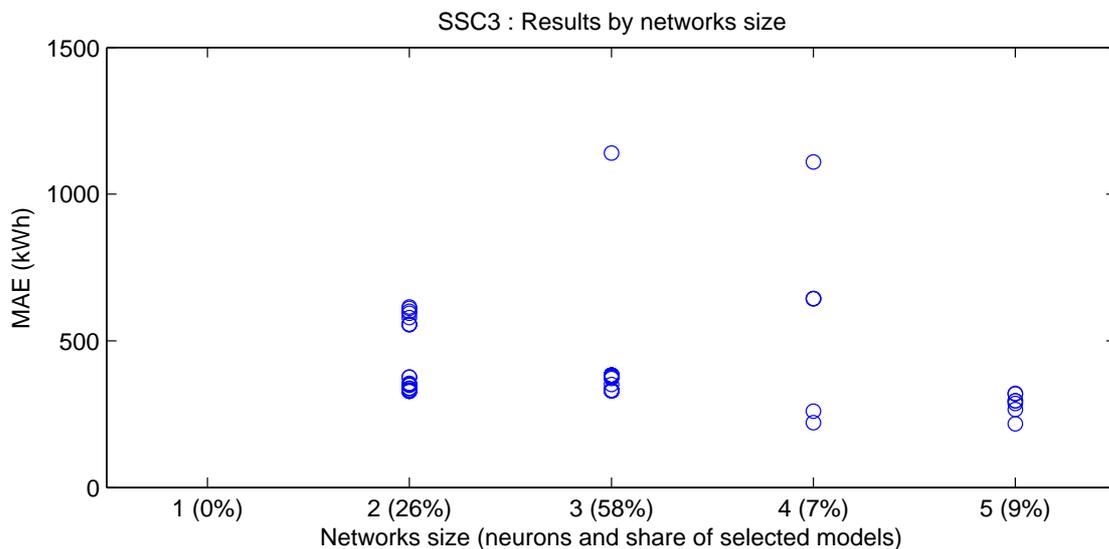


Figure 3-20 Répartition des erreurs absolue moyennes des modèles identifiés pour le SSC3 en fonction de la taille de leur réseau de neurones.

Les réseaux ne sont pas forcément de la même taille mais il semble tout de même qu'il existe une taille de prédilection pour chacun des systèmes (comme l'indiquent entre parenthèse, les pourcentages de réseaux sélectionnés en fonction de leur nombre de neurones) : le SSC1 et surtout le SSC2 semblent être plus facilement représentés par des réseaux de complexité maximale à 5 neurones, alors que 3 neurones semblent mieux convenir au modèle du SSC3. Les figures ci-dessus montrent également qu'il n'y a pas forcément de lien entre la complexité du modèle sélectionné et sa performance de généralisation : un modèle complexe peut être moins fiable qu'un modèle de complexité moindre, mais l'inverse est également possible.

Ainsi, malgré les 25 initialisations différentes des poids synaptiques pour chaque taille de réseau, le modèle sélectionné n'est pas forcément le même à chaque lancement de la procédure : les initialisations y jouent donc un rôle important. Le nombre de minima locaux dans la fonction de coût à minimiser doit être important. La

configuration de départ conditionne fortement la solution trouvée par l'algorithme d'optimisation.

Augmenter le nombre de jeux de poids synaptiques initiaux à tester dans la phase d'entraînement contribuerait sûrement à la sélection d'un modèle unique. Mais est ce souhaitable ?

- La fonction de coût à minimiser peut être si complexe qu'un nombre très important de réinitialisations serait nécessaire pour atteindre cet objectif, augmentant considérablement le temps de la procédure ;

- De plus, le test de validation et de sélection d'un réseau en « Boucle Fermée » (voir paragraphe 2.3.3) n'est pas infaillible. Certains modèles, présentant des coefficients R^2 très faibles, ont été sélectionnés par la procédure et pourtant ils ne permettent pas de réaliser une simulation correcte, alors que leur score de validation « Boucle Fermée » était le meilleur de leur série d'entraînement. Ces modèles sont probablement « surentrainés » et n'ont pas été filtrés par les différents tests de la procédure de sélection. De plus, il n'y a pas forcément de lien entre score de sélection (critère d , voir paragraphe 2.3.3.3) et performance de généralisation (MAE , voir paragraphe 3.1.3.1). En observant l'ensemble des résultats obtenus (voir la Figure 3-21), on peut facilement constater que le modèle présentant le meilleur score de sélection d à chaque procédure n'est pas forcément celui qui affiche les meilleurs résultats de généralisation. Ce qui signifie qu'en considérant l'ensemble des réseaux entraînés pour chaque SSC, le test de validation n'aurait pas retenu le modèle le plus pertinent.

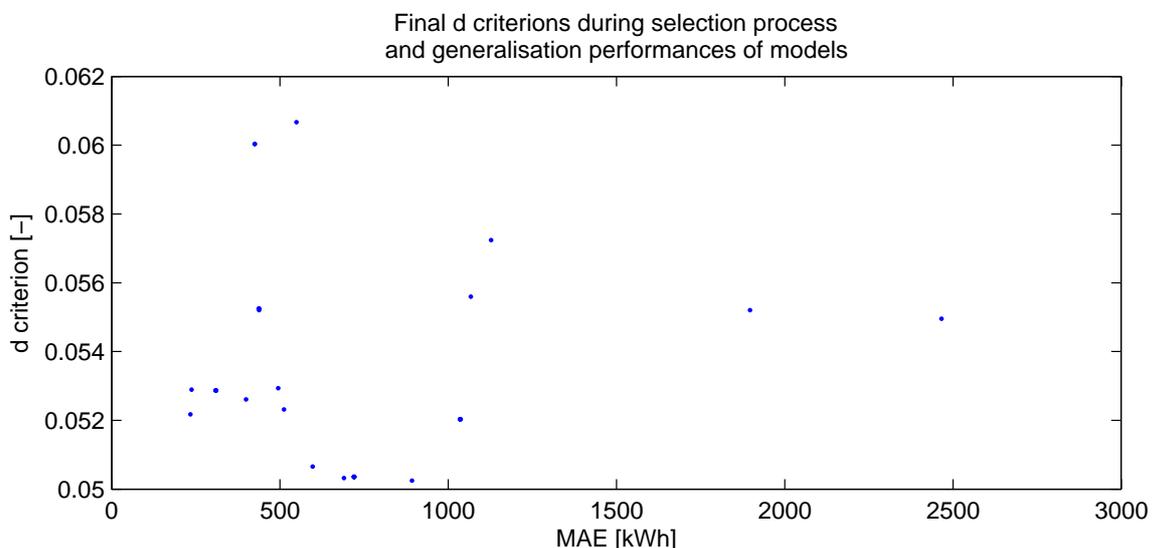


Figure 3-21 Représentation du critère « d » obtenu en phase de validation "Boucle Fermée" par chaque modèle sélectionné pour le SSC1, en fonction de leur critère de généralisation MAE.

Le choix d'un modèle unique à partir d'une seule application de la procédure de sélection semble donc délicat et risqué.

Il est possible de remarquer la similitude entre les résultats de certains modèles, formant ainsi des « groupes » (voir Tableau 3-14).

CHAPITRE 3

N° du modèle	Nombre de neurones	Score de sélection « Boucle Fermée »	MAE	R ² (Qaux)	R ² (Qcapt)	R ² (Qem)	Valeur absolue des poids synaptiques entre l'entrée 1 et les neurones de la couche cachée				
13	5	0,0529	238	0,999	0,934	0,992	0,00	0,29	1,48	3,02	3,15
5	5	0,0529	310	0,997	0,734	0,995	0,03	0,50	0,60	1,29	2,64
10	5	0,0529	310	0,997	0,734	0,995	0,03	0,50	0,60	1,29	2,64
15	5	0,0529	310	0,997	0,734	0,995	0,03	0,50	0,60	1,29	2,64
12	5	0,0529	310	0,997	0,734	0,995	0,03	0,50	0,60	1,29	2,64
3	5	0,0529	310	0,997	0,734	0,995	0,03	0,50	0,60	1,29	2,64
1	5	0,0529	310	0,997	0,734	0,995	0,03	0,50	0,60	1,29	2,64
9	4	0,0600	426	0,997	0,225	0,992	0,01	0,01	2,52	9,71	x
2	4	0,0523	513	0,980	0,724	0,990	0,03	0,34	9,12	9,58	x
8	5	0,0507	597	0,990	-1,984	0,997	0,00	0,03	0,81	1,06	1,91
11	5	0,0504	721	0,988	-3,406	0,996	0,01	0,06	0,77	1,07	1,92
7	5	0,0504	721	0,988	-3,406	0,996	0,01	0,06	0,77	1,07	1,92
6	5	0,0520	1036	0,978	-4,977	0,994	0,01	0,24	5,71	6,42	7,05
14	5	0,0520	1036	0,978	-4,977	0,994	0,01	0,24	5,71	6,42	7,05
4	4	0,0595	10095	-2,695	-2,016	-5,744	0,03	0,38	6,03	6,72	x

Tableau 3-14 Résultats correspondant aux 15 premiers modèles sélectionnés pour le SSC1, et valeur absolue de leurs poids synaptiques entre l'entrée Phi(1) et les neurones de la couche cachée

Le tableau ci-dessus représente les 15 premiers modèles sélectionnés pour le SSC1, triés par ordre croissant de leur critère *MAE*, et les poids synaptiques identifiés entre l'entrée et les neurones de la couche cachée, également triés par valeurs croissantes. Il illustre particulièrement quelques groupes de modèles du SSC1 (lignes 2 à 7, lignes 11 et 12 et lignes 13 et 14 par exemple).

Chaque groupe est lié à un minimum local particulier de la fonction de coût, qui se traduit par des valeurs de poids synaptiques spécifiques. Un groupe contenant un nombre important de modèles signifie que cette solution est plus facilement identifiée par l'algorithme d'optimisation et présente un score de test en « Boucle Fermée » suffisamment bon pour se différencier des autres modèles. Cependant, la taille du groupe ne représente pas pour autant les modèles les plus aptes à généraliser les connaissances acquises. De plus, certains de ces groupes affichent des coefficients *R*² très faibles. Il ne semble donc pas judicieux non plus de se baser sur la taille d'un groupe pour sélectionner un modèle représentant le SSC testé.

Une option serait de travailler avec plusieurs de ces modèles en analysant leurs informations : ce point sera discuté dans le paragraphe 3.3.3.

Malgré la diversité des modèles sélectionnés, il est également remarquable que la majorité d'entre eux estiment de manière très correcte les énergies sur l'ensemble des 27 simulations de validation, du moins pour l'énergie consommée par la chaudière et celle fournie pour les besoins de chauffage. Les figures ci-dessous (Figure 3-22, Figure 3-23 et Figure 3-24) représentent la distribution des résultats, en pourcentage du nombre de modèles sélectionnés.

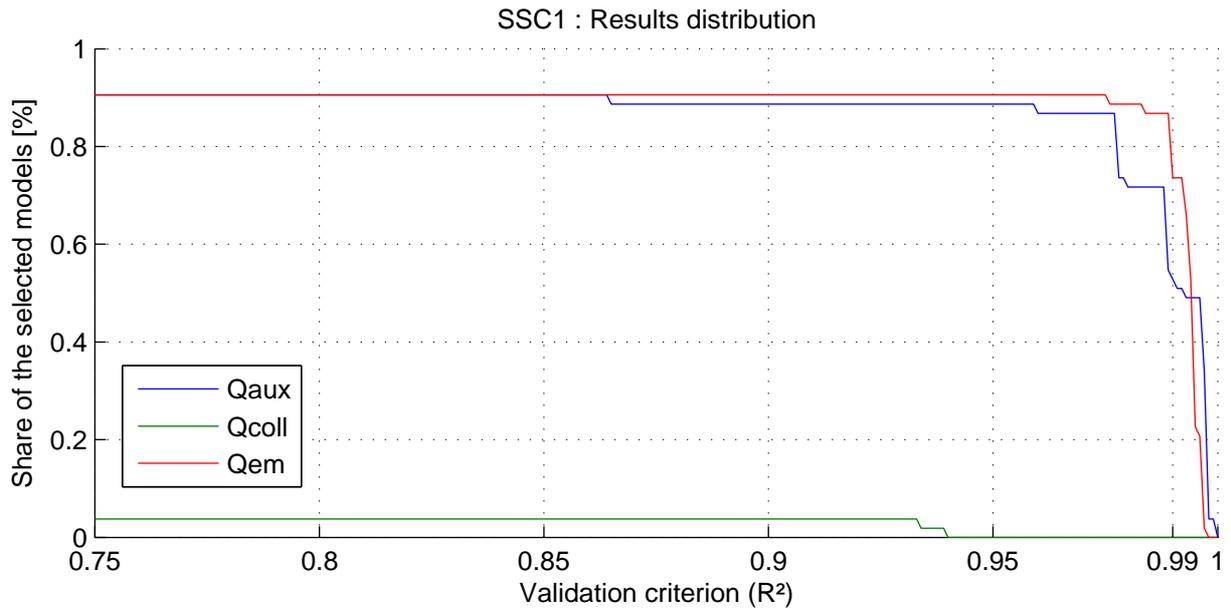


Figure 3-22 Répartition des modèles sélectionnés pour le SSC1 dont le coefficient de corrélation statistique est supérieur à la valeur de l'axe des abscisses, pour chacune des sorties

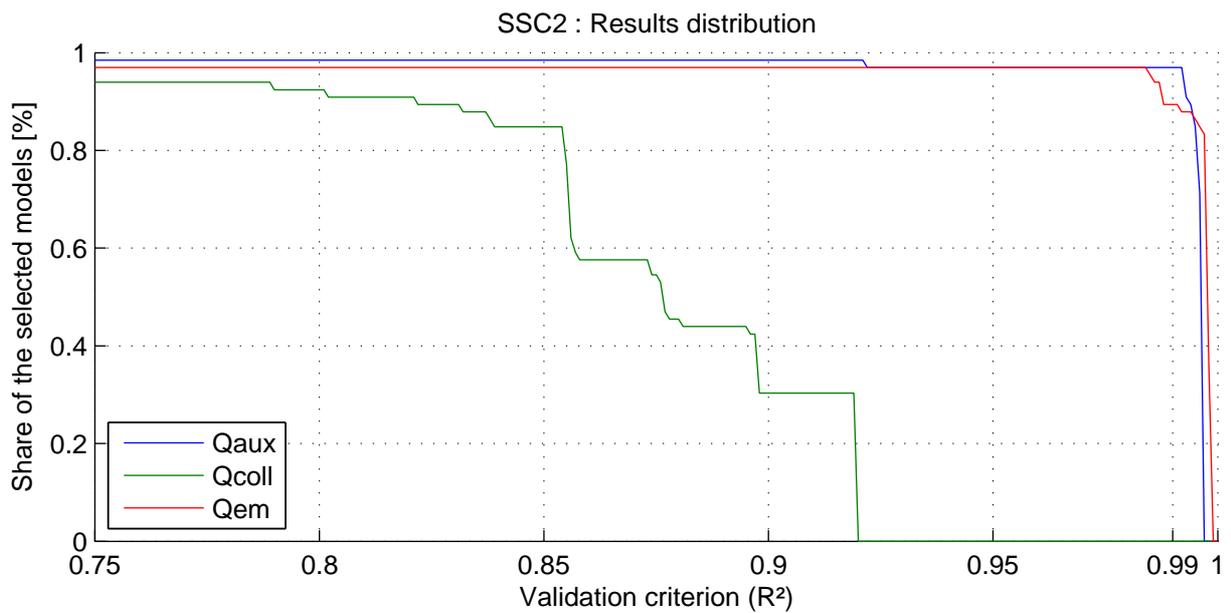


Figure 3-23 Répartition des modèles sélectionnés pour le SSC2 dont le coefficient de corrélation statistique est supérieur à la valeur de l'axe des abscisses, pour chacune des sorties

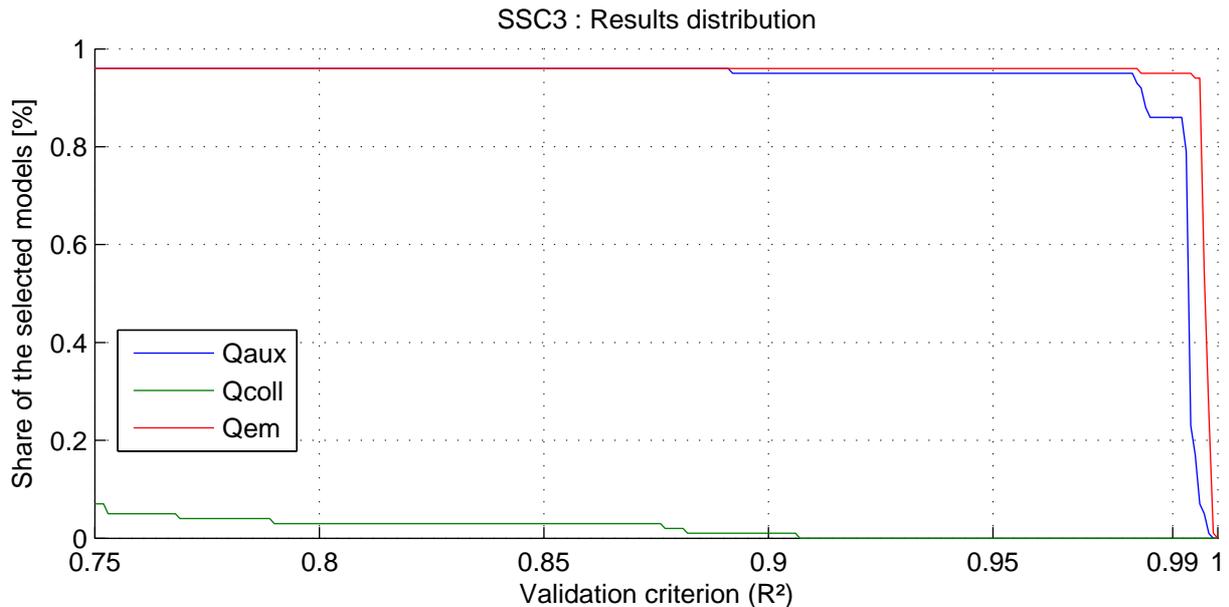


Figure 3-24 Répartition des modèles sélectionnés pour le SSC3 dont le coefficient de corrélation statistique est supérieur à la valeur de l'axe des abscisses, pour chacune des sorties

Plus de 80% des modèles sélectionnés pour les SSC2 et SSC3 ont de très bons coefficients de corrélations statistiques R^2 , supérieurs à 0,99, pour l'estimation des énergies consommées par l'appoint Q_{aux} et reçues par les émetteurs de chaleur Q_{em} . Un peu moins de modèles montrent d'aussi bon résultats pour le SSC1 mais représentent tout de même une bonne majorité (plus de 50% pour Q_{aux} et un peu moins de 75% pour Q_{em}). Outre ces excellentes estimations de Q_{aux} et Q_{em} , la plupart des autres résultats (de l'ordre de 90%) relatifs à ces énergies ont des coefficients R^2 juste légèrement inférieurs à 0,99. L'ensemble est donc très satisfaisant.

De manière générale, l'énergie récupérée par les capteurs Q_{coll} semble plus difficile à généraliser que les autres énergies en sortie de modèle. Le coefficient R^2 correspondant à cette sortie n'est supérieur à 0,9 que pour de rares modèles de chaque SSC. Une analyse de la difficulté de généralisation de Q_{coll} sera faite en détail dans le prochain paragraphe.

Quelle que soit la sortie considérée, il existe des potentiels très différents entre les trois systèmes pour sélectionner des modèles à fort pouvoir de généralisation. Le SSC2 semble être le système le plus facile à modéliser. Les SSC1 et SSC3 posent un peu plus de difficultés : surtout par rapport à Q_{aux} pour le premier et Q_{coll} pour le dernier. De plus, des modèles inadéquats (présentant des coefficients R^2 très bas, voire aberrants) ont été sélectionnés en plus grande quantité pour ces deux systèmes que pour le SSC2. Ces observations sont forcément liées aux particularités propres à chaque système et à leur séquence d'entraînement.

Ainsi peut-on faire l'hypothèse que, dans le cas du SSC2, l'utilisation moins saccadé de la chaudière et la meilleure estimation de la température de stockage qui en résulte (voir l'étude des séquences d'entraînement de chaque SSC dans le paragraphe 0) permet un entraînement plus aisé de réseaux de neurones fiables.

Ceci est dû à la fois au fonctionnement propre à chaque système et à la qualité des « sous-modèles » de la partie « Boîte Blanche » des modèles globaux de SSC.

Les caractéristiques de chaque système et la qualité de la séquence d'entraînement jouent donc un rôle non négligeable pour l'évaluation des performances des SSC. Leurs impacts sur l'estimation des performances des SSC sont également analysés dans le paragraphe suivant.

3.3.2. Estimations des performances avec les modèles « Boîte Grises »

3.3.2.1. Remarques générales

Après avoir analysé les séries de procédures de manière globale, nous étudions plus en détail l'estimation des performances des SSC par leurs modèles identifiés. Pour cette étude, nous nous plaçons en conditions « réelles » de test en considérant les performances évaluées par le modèle « Boîte Grise » présentant un des meilleurs coefficients MAE_{ref} pour chacun des systèmes (il est également choisi pour sa capacité à illustrer facilement les principales observations correspondant à la plupart des modèles).

On peut tout d'abord comparer les résultats obtenus avec la nouvelle approche développée dans cette étude par rapport aux résultats que l'on obtiendrait avec la méthode « SCSPT classique ». Cette démarche est illustrée par la Figure 3-25.

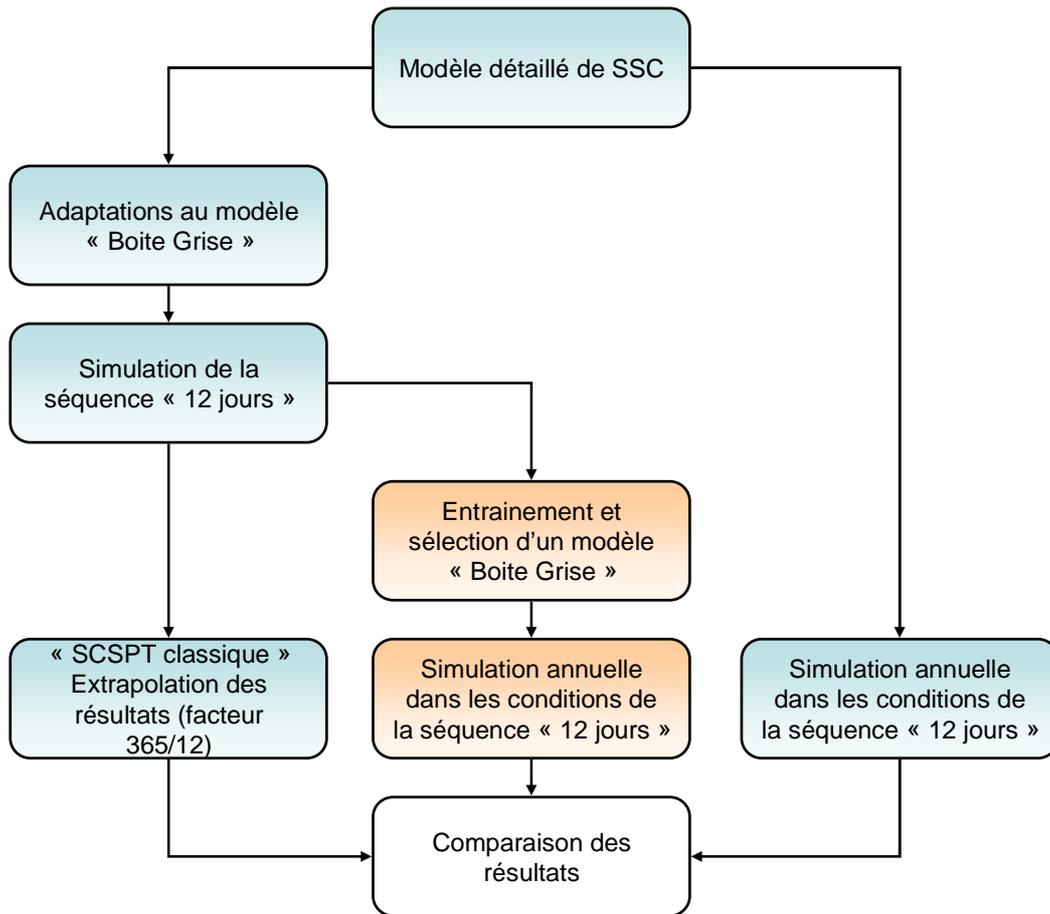


Figure 3-25 Schéma représentant la comparaison des résultats obtenus selon la méthode « SCSPT classique », son extension par modélisation « Boîte Grise » et la modélisation détaillée du SSC étudié.

Pour la méthode « SCSPT classique », l'énergie consommée par la chaudière d'appoint pendant la séquence de test de 12 jours est simplement multipliée par un facteur $365/12$ pour évaluer la consommation annuelle correspondante. Cette énergie est comparée aux résultats de la simulation correspondant à l'environnement de la séquence de test, pour le modèle « Boîte Grise » et le modèle TRNSYS de chaque SSC (Figure 3-26, Figure 3-27 et Figure 3-28).

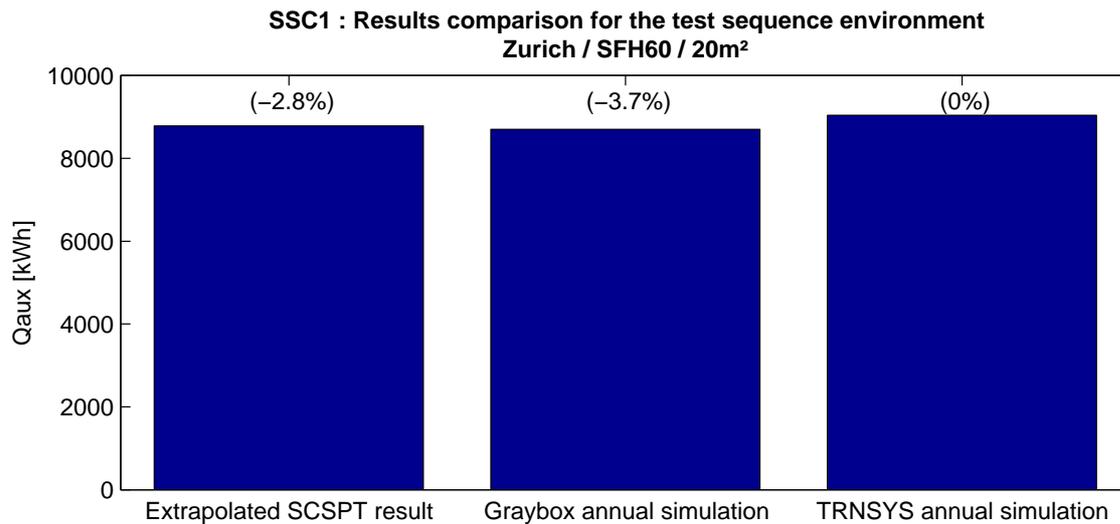


Figure 3-26 Comparaison des estimations de la consommation annuelle d'énergie d'appoint par le SSC1 pour les conditions énergétiques de la séquence de test , entre la méthode SCSP "classique", son extension par modélisation "Boîte Grise" et le modèle détaillé TRNSYS (*entre parenthèses : différence par rapport à la simulation TRNSYS*)

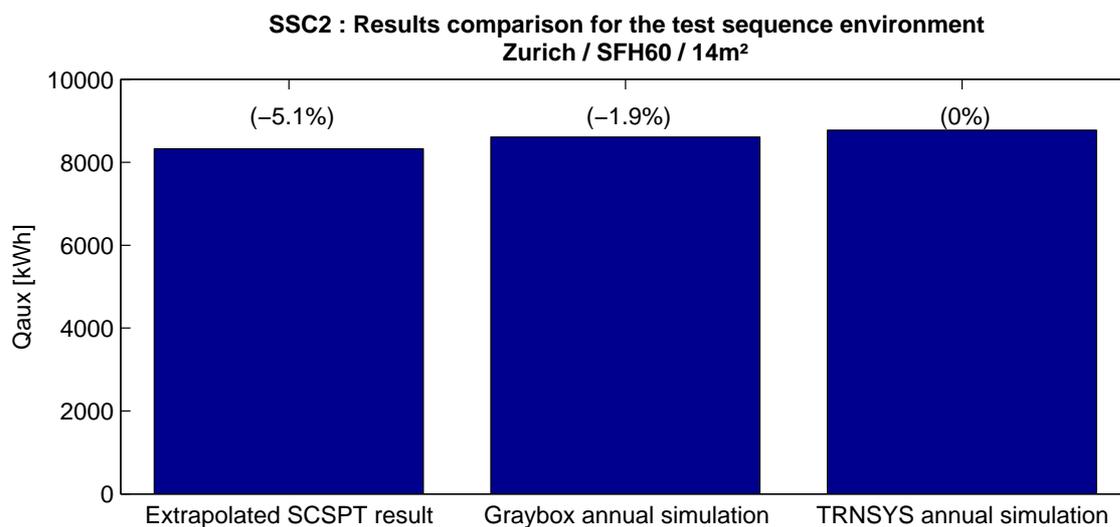


Figure 3-27 Comparaison des estimations de la consommation annuelle d'énergie d'appoint par le SSC2 pour les conditions énergétiques de la séquence de test , entre la méthode SCSP "classique", son extension par modélisation "Boîte Grise" et le modèle détaillé TRNSYS (*entre parenthèses : différence par rapport à la simulation TRNSYS*)

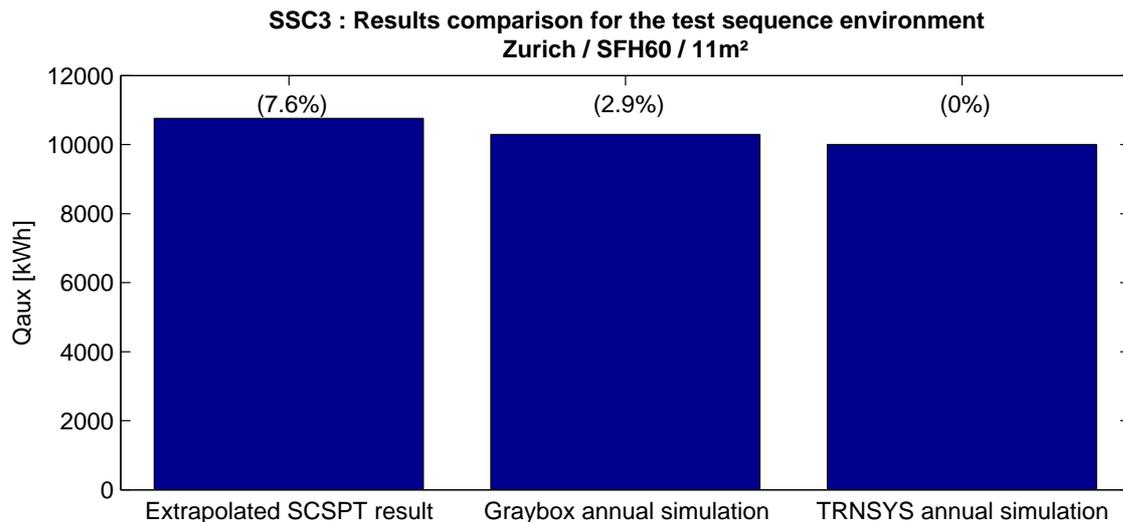


Figure 3-28 Comparaison des estimations de la consommation annuelle d'énergie d'appoint par le SSC3 pour les conditions énergétiques de la séquence de test , entre la méthode SCSPT "classique", son extension par modélisation "Boîte Grise" et le modèle détaillé TRNSYS (entre parenthèses : différence par rapport à la simulation TRNSYS)

En comparant avec les résultats obtenus avec TRNSYS, l'estimation de la consommation annuelle d'énergie d'appoint faite par l'extension « Boîte Grise » donne des résultats globalement similaires à la méthode « SCSPT classique », voire meilleurs, pour l'environnement de la séquence de test. Elle donne une évaluation légèrement moins précise pour le SSC1 mais ne dépasse jamais les 5% sur l'ensemble, contrairement à la méthode SCSPT « classique » pour laquelle on observe des écarts allant jusqu'à 7% (SSC3).

Finalement, ces résultats montrent que l'approche de test par modélisation « Boîte Grise » développée dans ces travaux de recherche semble donner des résultats au moins équivalents, sinon meilleurs, que les résultats obtenus actuellement avec la méthode « SCSPT » classique pour les conditions de tests.

Cependant, le principal avantage attendu par l'identification d'un modèle « Boîte Grise » du SSC testé, est qu'il puisse estimer ses performances au-delà des conditions de tests. Nous allons donc comparer les résultats des modèles « Boîte Grise » aux résultats des modèles détaillés de TRNSYS des 3 SSC testés pour d'autres environnements énergétiques. L'estimation des énergies mises en jeu lors des 27 simulations de validation (combinant les 3 climats, 3 bâtiments et 3 surfaces de capteurs présentés dans le paragraphe 3.1.1) est présentée sur les figures ci-après (Figure 3-29, Figure 3-30 et Figure 3-31).

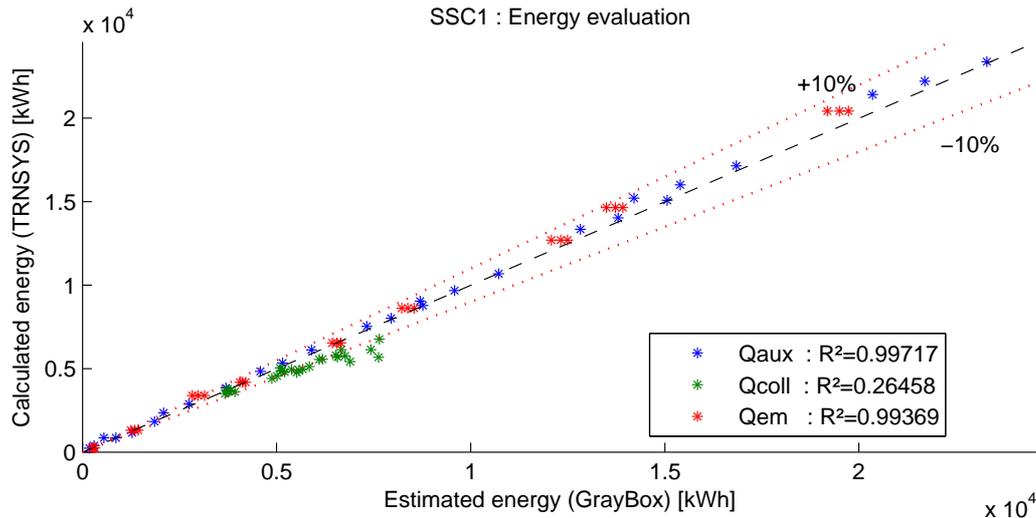


Figure 3-29 Comparaison des énergies estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS, lors des 27 simulations de validation du SSC1

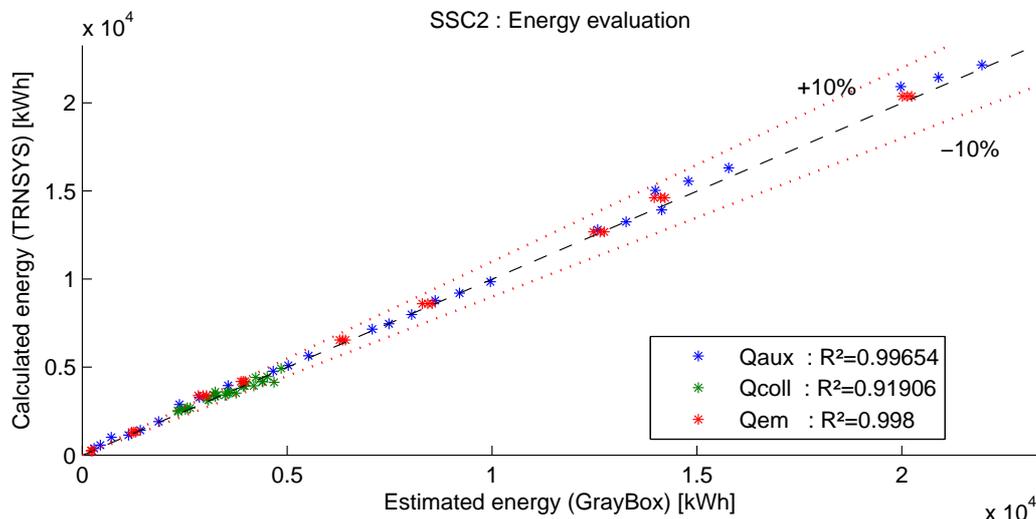


Figure 3-30 Comparaison des énergies estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS, lors des 27 simulations de validation du SSC2

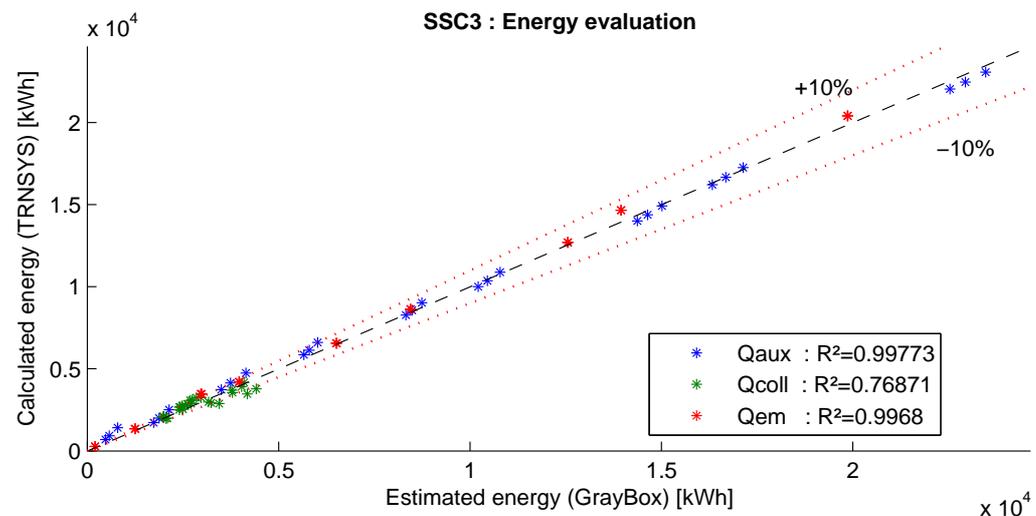


Figure 3-31 Comparaison des énergies estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS, lors des 27 simulations de validation du SSC3

CHAPITRE 3

D'une manière générale, les estimations réalisées par le modèle « Boîte Grise » de chaque SSC sont très satisfaisantes car très proches des calculs effectués par le logiciel TRNSYS. Pour la grande majorité des simulations, les écarts relatifs sont inférieurs à 10%.

Les différences sont tout de même un peu plus importantes pour les simulations ayant pour climat celui de Barcelone, et encore plus lorsque le bâtiment a de faibles besoins énergétiques. Sur les figures ci-dessus, les simulations correspondantes sont représentées par les points Q_{aux} et Q_{em} inférieurs à 5000kWh. Il existe plusieurs raisons à cela :

- Les faibles niveaux d'énergies mis en jeu au sein des systèmes dans ces environnements font qu'une légère différence absolue peut entraîner une importante différence relative ;
- Les conditions extrêmes de cet environnement (très fort ensoleillement et faibles besoins énergétiques) sont éloignées des conditions de la séquence d'entraînement et sollicitent les systèmes de manière quelque peu différente, moins évidente à généraliser pour les modèles ;
- Les erreurs d'estimation de besoins de chaleur pour ces environnements sont déjà, à la base, plus importantes au niveau de la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC. Le modèle de bâtiment correspondant, qui n'a pas de protections solaires (voir paragraphe 2.2.2.3) présente des différences de besoins allant de 17 à 34% pour le climat de Barcelone, par rapport au bâtiment de la tâche 32 de l'IEA (avec protections anti-surchauffes estivales). Ces différences sont donc inévitables, même pour un réseau de neurones supposé parfait.

La plage de valeur prise par Q_{coll} , l'énergie récupérée par les capteurs, sur l'ensemble des 27 simulations est beaucoup plus réduite comparées à celles prises par Q_{em} et Q_{aux} . Ceci semble une des raisons du moins bon coefficient de corrélation pour cette énergie : dans ces conditions, une faible erreur fait chuter plus rapidement le coefficient R^2 . Effectivement, en se référant à l'équation (3-6), si la variance des énergies annuelles Q_{coll} estimées par TRNSYS est faible (valeurs proches de leur moyenne), les différences d'estimation ont un impact plus important sur la valeur de R^2 . On peut voir par exemple sur la Figure 3-32 relative au SSC2 que la plupart des énergies est plutôt bien estimée avec des différences inférieures à 10% par rapport aux simulations TRNSYS, sauf pour l'environnement [Stockholm/SFH100/14m²] qui dépasse légèrement cette limite. Or le coefficient de corrélation pour l'estimation de Q_{coll} est pourtant bien inférieur à celui des deux autres énergies.

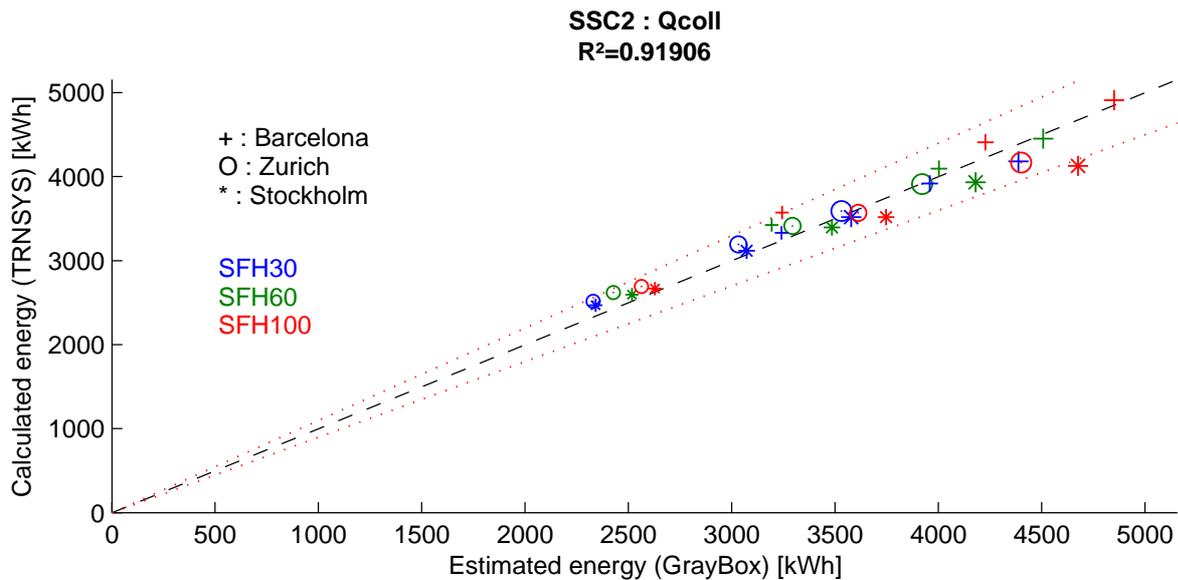


Figure 3-32 Comparaison des énergies récupérées par les capteurs, estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS lors des 27 simulations de validation du SSC2

Ceci explique en partie pourquoi les coefficients de corrélation sont beaucoup plus faibles pour Q_{coll} que pour Q_{em} et Q_{aux} , mais cela ne doit pas occulter le fait que sur certaines simulations, les modèles « Boîte Grise » n'estiment pas correctement cette énergie. Les raisons supposées pour expliquer ces problèmes d'estimation dépendent du type de SSC et sont évoquées ci-dessous dans l'analyse complète du modèle retenu pour chacun des SSC.

Bien qu'ils ne concernent qu'un modèle « Boîte Grise » particulier à chaque SSC, les points soulevés sont les principales observations communes faites pour la grande majorité des modèles ne présentant pas de résultats aberrants.

3.3.2.2. Analyse du modèle « Boîte Grise » du SSC1

Le modèle représentant le SSC1 est très précis sur l'estimation de l'énergie consommée par la chaudière (son coefficient de corrélation est supérieur à 0,997), alors que la forme « saccadée » de ce signal n'est pas identifiable aisément (comme déjà évoqué dans le paragraphe 3.2.1). En fait, comme le montre la Figure 3-33, le fonctionnement exact de la chaudière n'est pas assimilé précisément mais le modèle « Boîte Grise » fournit en quelque sorte par période une moyenne glissante de l'énergie d'appoint consommée qui réalise une estimation très satisfaisante sur la totalité de la simulation.

CHAPITRE 3

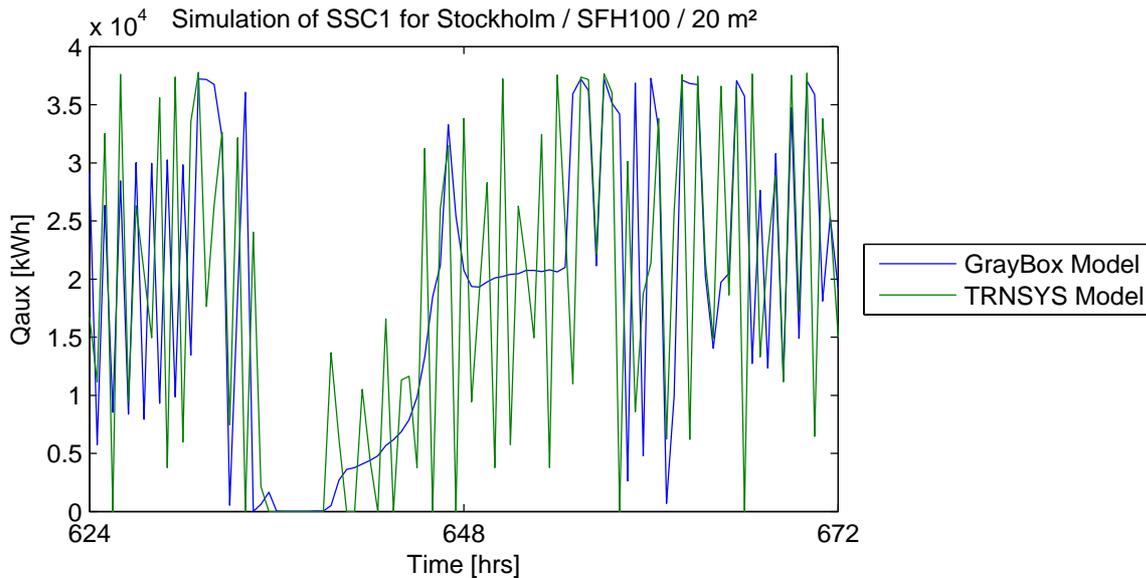


Figure 3-33 Extrait d'une simulation annuelle du SSC1 selon ses modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné (« Boîte Grise »), illustrant la consommation de la chaudière.

L'estimation de l'énergie fournie aux émetteurs est aussi globalement correcte mais la précision est variable en fonction de la surface des capteurs alors que les besoins de chauffage sont les mêmes pour un couple « Bâtiment/Climat » donné (voir la Figure 3-34).

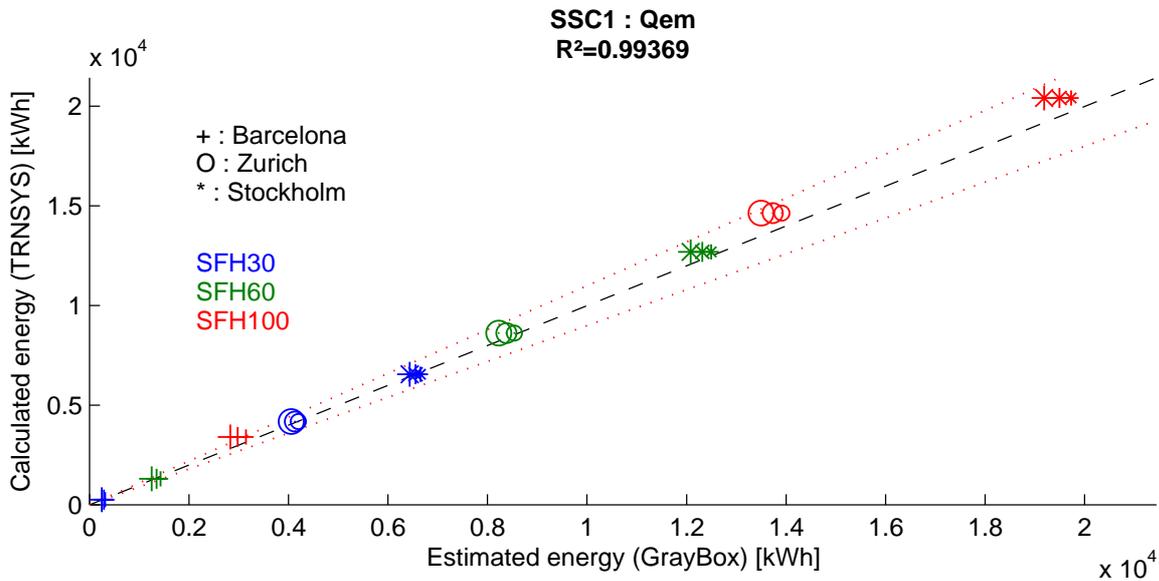


Figure 3-34 Comparaison des énergies fournies aux émetteurs de chaleur dans les 27 simulations de validation, entre les modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné ("Boîte Grise") – cas du SSC1

Outre le fait que la partie « Boîte Blanche » engendre des erreurs de base pour Q_{em} , il semble que le modèle global du SSC1 affiche une légère tendance à modifier la fourniture de chaleur pour les besoins de chauffage en fonction de la surface des capteurs. On constate effectivement sur la Figure 3-35 que le profil de la température moyenne mensuelle de l'air intérieur est légèrement différent selon la surface des capteurs considérée (notamment pour les mois 3, 4 et 5).

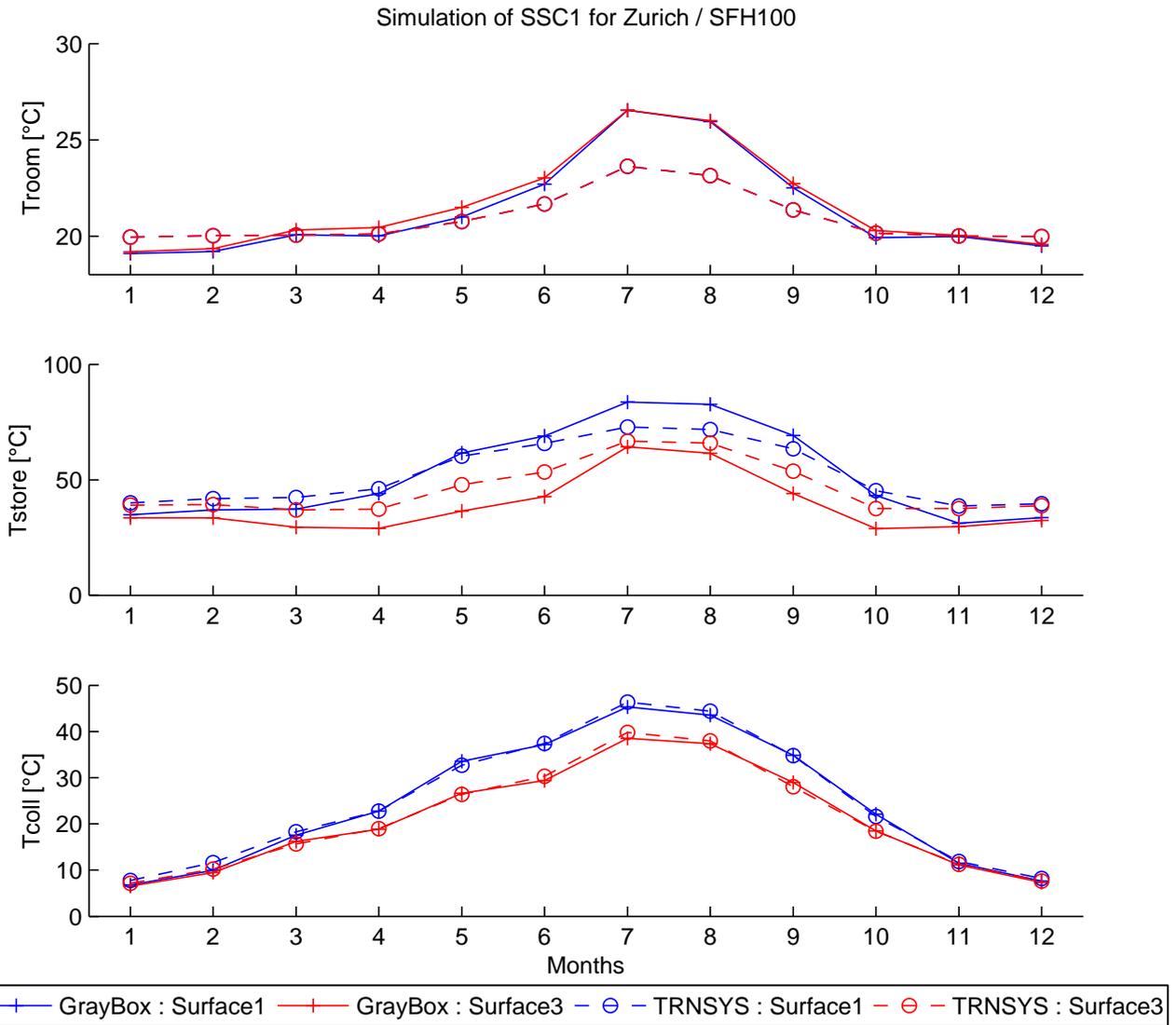


Figure 3-35 Evolutions de la température moyenne mensuelle de l'air intérieur du bâtiment SFH100 chauffé par le SSC1, ainsi que celle du ballon de stockage et des capteurs pour des simulations annuelles du climat de Zurich

Le modèle « Boîte Grise » a donc assimilé une sorte de corrélation inappropriée entre \dot{Q}_{em} et A_{coll} . On peut se demander comment ce lien s'est créé au niveau du réseau de neurones. En observant plus précisément les entrées de celui-ci (vecteur de régression φ défini dans le paragraphe 2.2.3.1), il apparaît que les seules variables dépendantes de la surface des capteurs sont la température moyenne des capteurs T_{coll} (via l'apport solaire net des capteurs $\dot{Q}_{sol,net}$) et la température moyenne du ballon de stockage T_{store} . Ces variables influencent à tort l'évaluation de \dot{Q}_{em} lors des simulations. Une plus grande richesse d'information au niveau de la séquence d'entraînement pourrait sûrement empêcher la création de liens entre \dot{Q}_{em} et T_{coll} et/ou T_{store} . Une mauvaise estimation de ces températures peut également accentuer le phénomène observé.

CHAPITRE 3

Une analyse rapide des poids affectés au réseau de neurones du modèle ne permet pas de déterminer de manière précise laquelle de ces deux variables pèse le plus sur \dot{Q}_{em} , étant donné que les entrées concernées ont des influences non négligeables sur tous les neurones. Il est cependant possible de remarquer que la température T_{coll} est très bien estimée pour les simulations présentées dans la Figure 3-35 alors que la température T_{store} est évaluée de manière plus incertaine. Ces constats ne donnent que des hypothèses sur l'origine de ce phénomène. Aucune conclusion n'a été établie pour le moment.

On remarque également sur la Figure 3-35 que la température T_{room} est bien en deçà de sa température de consigne (20°C) et de manière semblable quelle que soit la surface des capteurs. Cette observation est en fait valable pour la plupart des simulations du SSC1 dans des environnements « énergivores ». Pour étudier ce phénomène, observons plus en détail la simulation correspondant à l'environnement [Stockholm / SFH60 / 20m²], sur la Figure 3-36.

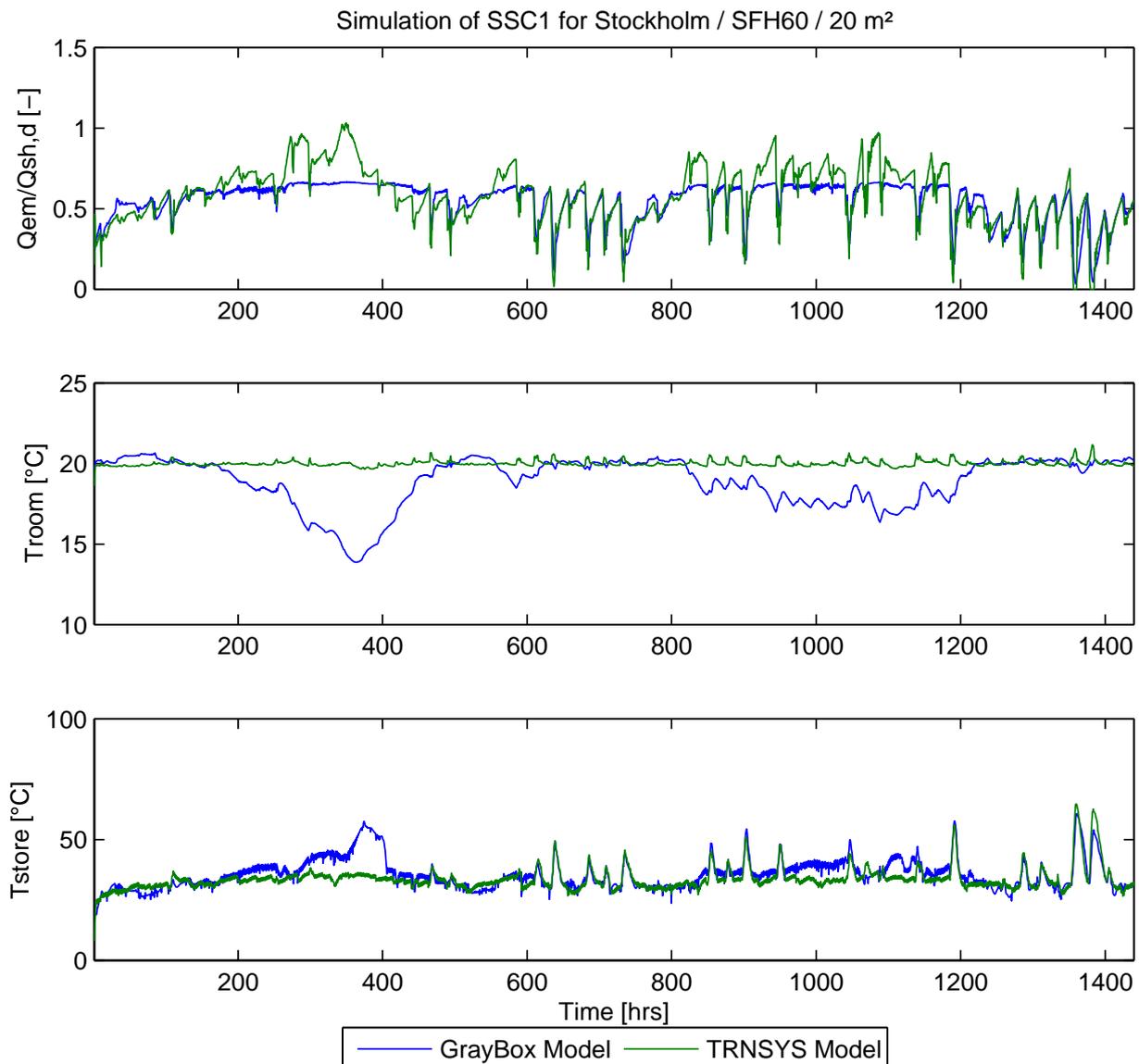


Figure 3-36 Extrait de la simulation annuelle du SSC1 selon ses modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné (« Boîte Grise ») pour le climat de Stockholm, le bâtiment SFH60 et une surface de capteurs de 20m²

La Figure 3-36 ci-dessus représente sur le premier graphique le taux de sollicitation des émetteurs de chaleur (la puissance reçue par les émetteurs \dot{Q}_{em} divisée par la charge nominale de dimensionnement $\dot{Q}_{sh,d}$, voir paragraphe 3.1.1.4), ainsi que la température de l'air intérieur T_{room} (deuxième graphique) et la température moyenne du ballon de stockage T_{store} (troisième graphique). Elle montre clairement que le modèle « Boîte Grise » a quelques difficultés d'estimation de \dot{Q}_{em} lorsque les besoins de chauffage sont importants. En effet, la température extérieure étant très basse en ce début de simulation, le SSC1 chauffe le bâtiment avec un rapport $\dot{Q}_{em}/\dot{Q}_{sh,d}$ se rapprochant souvent de 1. Or, dans ces conditions, le modèle « Boîte Grise » semble faire « saturer » ce rapport à une valeur aux alentours de 0,65, qui correspond à la valeur maximum à laquelle il a été confronté avec la séquence d'entraînement (voir

CHAPITRE 3

l'évolution du vecteur de régression des sorties et notamment $y(3)$ sur la Figure 3-8). La séquence d'entraînement ne contenant pas de phase de charge maximum au niveau des besoins de chauffage, le modèle entraîné ne réussit pas à traiter correctement le comportement du SSC dans ces conditions. Par conséquent, la température de l'air intérieur décroît de manière importante, bien en dessous de sa température de consigne.

La Figure 3-36 souligne également un comportement particulier du modèle « Boîte Grise » du SSC1, visible plus particulièrement aux alentours de la 400^e heure. Malgré le manque de puissance envoyée pour répondre aux besoins de chauffage \dot{Q}_{em} , le modèle « Boîte Grise » estime la fourniture d'énergie d'appoint \dot{Q}_{aux} de manière indépendante de ce phénomène. Le bilan d'énergie au sein du système est donc bouleversé par rapport à la simulation de référence sous TRNSYS, ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne du ballon de stockage. L'évolution de T_{store} se trouve ainsi perturbée par ce phénomène, ce qui peut éventuellement entraîner des difficultés pour estimer les énergies en sortie de réseau de neurones.

Cette observation peut sûrement être expliquée par le fonctionnement propre du SSC1. S'agissant d'un système de type C2 (voir paragraphe 3.2.1), la chaudière d'appoint est uniquement reliée au ballon de stockage et n'a pas de lien direct avec le circuit de chauffage : la consommation d'énergie d'appoint Q_{aux} ne se trouve donc pas affectée directement par la « saturation » de l'énergie reçue par les émetteurs Q_{em} .

En ce qui concerne l'évaluation des énergies fournies par les capteurs (voir Figure 3-37), les écarts entre les résultats du modèle TRNSYS et ceux du modèle « Boîte Grise » sont assez importants. Globalement, ce dernier type de modèle surestime l'énergie Q_{coll} . Cette surestimation est d'autant plus importante que la ressource solaire est importante.

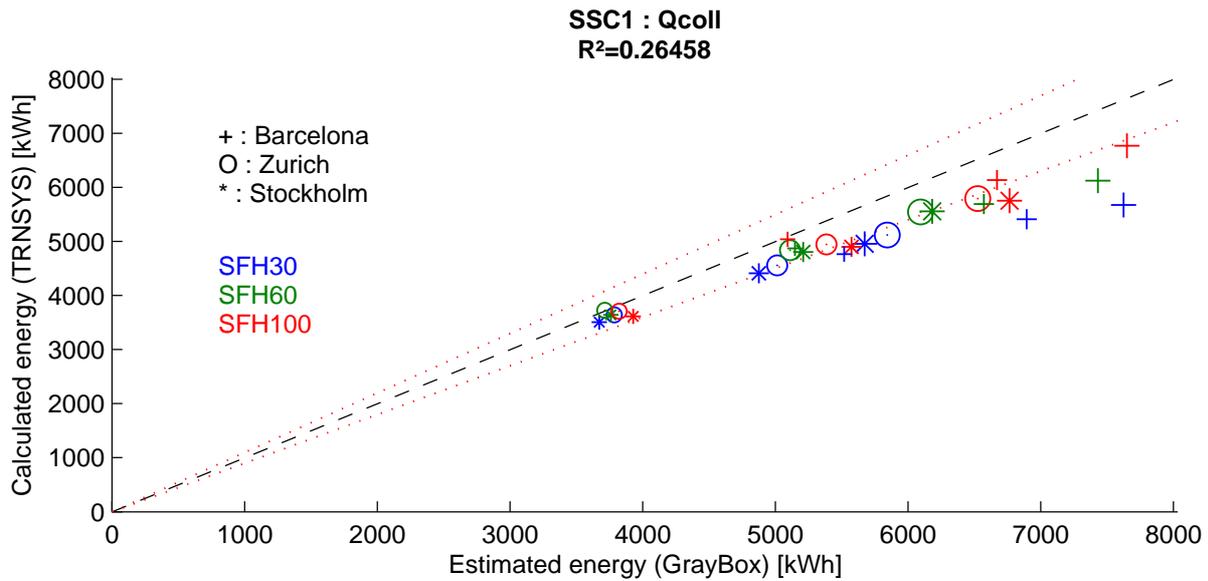


Figure 3-37 Comparaison des énergies récupérées par les capteurs, estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS lors des 27 simulations de validation du SSC1

Pour analyser ce phénomène, les données mensuelles de la simulation [Barcelone / SFH30 / 20m²] sont étudiées et présentées sur la Figure 3-38.

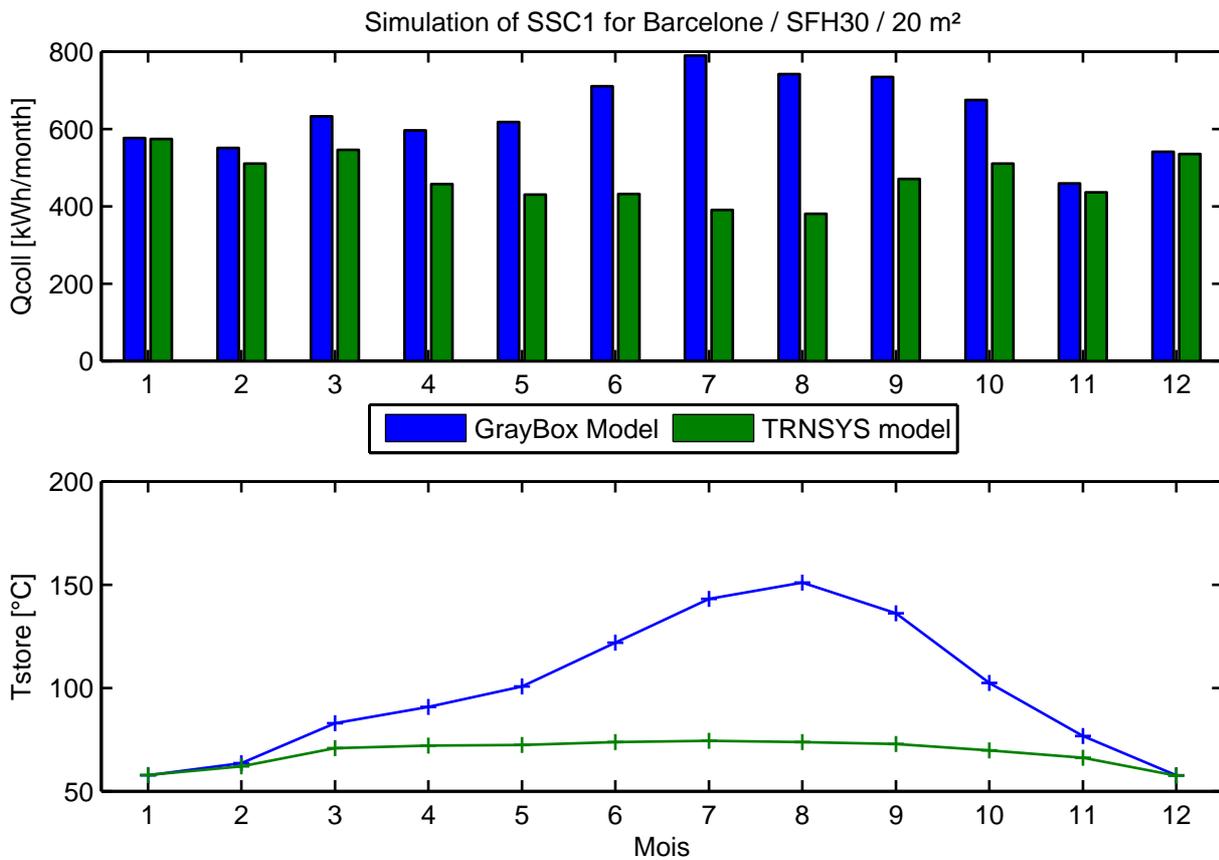


Figure 3-38 Evolution de l'énergie mensuelle récupérée par les capteurs du SSC1 ainsi que celle de la température moyenne mensuelle de son ballon de stockage, pour l'environnement Barcelone/SFH100/20m² de capteurs

CHAPITRE 3

La sur-estimation de Q_{coll} a lieu principalement en période estivale, comme le montre l'évolution de la température moyenne de stockage (Figure 3-38). Lorsque T_{store} atteint une certaine valeur, le modèle détaillé du SSC1 sous TRNSYS indique qu'il n'y a plus de chaleur récupérée venant des capteurs, en raison d'une logique de régulation qui coupe le circulateur de la boucle capteur au-delà d'un seuil de température dans le ballon de stockage. Dans les mêmes conditions, le modèle « Boîte Grise » indique que la charge du ballon de stockage se poursuit pour atteindre des valeurs exagérées. Une nouvelle fois, l'origine de ce défaut vient d'un manque d'information contenue dans la séquence d'entraînement : le réseau de neurone, n'ayant jamais été confronté à une situation de charge maximale du ballon de stockage, ne peut réagir correctement face à une situation qui lui est inconnue.

Le sur-stockage intervenant ainsi dans le modèle « Boîte Grise » n'a cependant qu'une très faible influence sur l'estimation des performances car les estimations de consommation d'énergie d'appoint ne sont que légèrement sous évaluées : la Figure 3-39 ci-dessous montre en effet que l'évaluation de Q_{aux} est très satisfaisante pour l'ensemble des 27 simulations de validation.

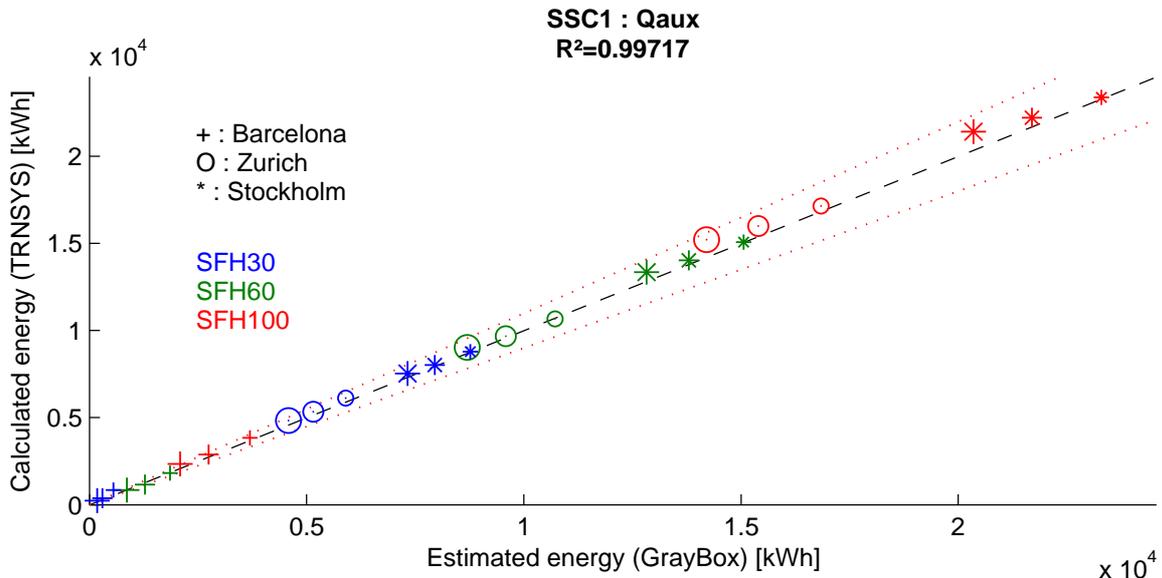


Figure 3-39 Comparaison des énergies consommées par l'appoint, estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS lors des 27 simulations de validation du SSC1

Pour le SSC1, l'utilisation des résultats obtenus d'une part par son modèle « Boîte Grise » étudié dans ce paragraphe (modèle ayant un des meilleurs critères MAE_{ref}) et d'autre part par son modèle TRNSYS permet de le caractériser de la manière suivante (Figure 3-40).

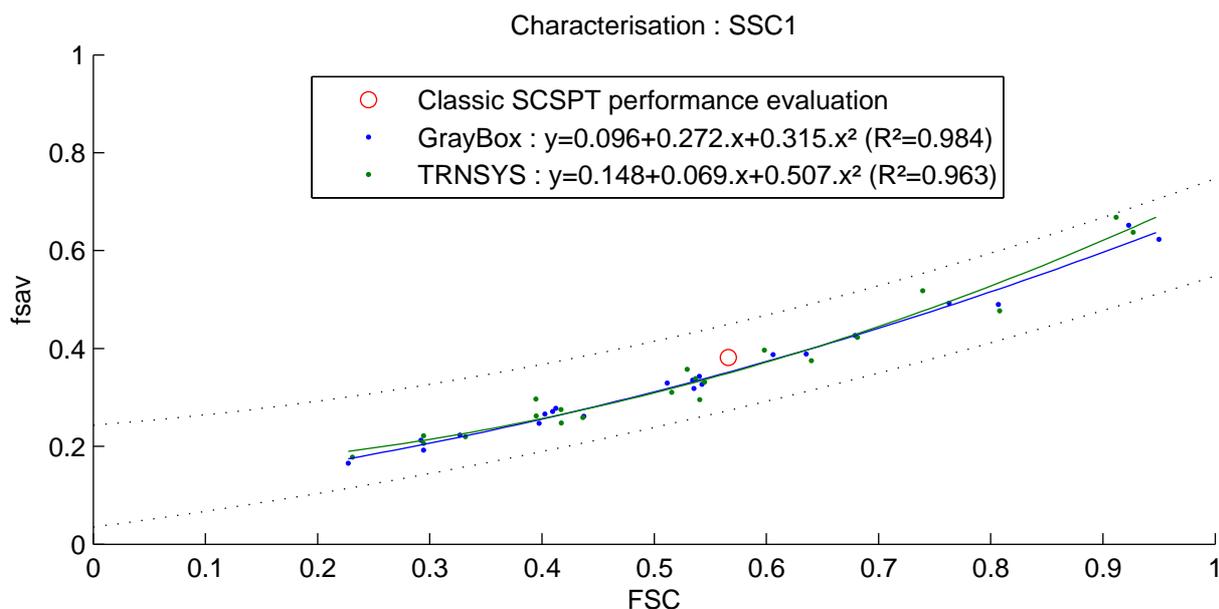


Figure 3-40 Caractérisation du SSC1 à l'aide d'un de ses modèles "Boîte Grise" identifiés et à l'aide de son modèle "TRNSYS"

La performance évaluée pour les conditions de la séquence de test selon la méthode SCSPT « classique » (simple extrapolation des résultats de la séquence de test « 12 jours ») est représentée par le point rouge sur le graphe ci-dessus. Sa proximité par rapport aux deux courbes obtenues montre une bonne cohérence entre les résultats obtenus par les 3 méthodes.

La caractérisation du SSC1 est très similaire quel que soit l'approche utilisée. Les courbes obtenues grâce à chaque modèle sont quasiment superposées, notamment sur la plage de FSC comprise entre 0,4 et 0,7, qui encadre le FSC de la séquence d'entraînement. La courbe correspondant au modèle « Boîte Grise » (en bleu) sous-estime très légèrement les performances du SSC1 à ses extrémités, par rapport à la courbe obtenue par le modèle TRNSYS (en vert) mais les différences sont très faibles.

La caractérisation du SSC1 par la méthodologie proposée est donc très concluante.

3.3.2.3. Analyse du modèle « Boîte Grise » du SSC2

De manière générale, le SSC2 ne semble pas poser de soucis particuliers pour sa modélisation globale (voir la Figure 3-30). En considérant les remarques générales du paragraphe 3.3.2.1, l'ensemble des énergies est très bien estimé pour toutes les simulations. L'étude des séries d'entraînement a également montré qu'il était plus facile de déterminer des modèles performants avec ce système plutôt qu'avec les deux autres. Une des raisons réside très probablement dans son fonctionnement qui donne des signaux plus simples à apprendre comme par exemple la puissance consommée par la chaudière d'appoint \dot{Q}_{aux} en lien étroit avec les besoins de chauffage puisque ce système est du type B1 selon Combisol (voir paragraphe 3.2.2 et Figure 3-41).

CHAPITRE 3

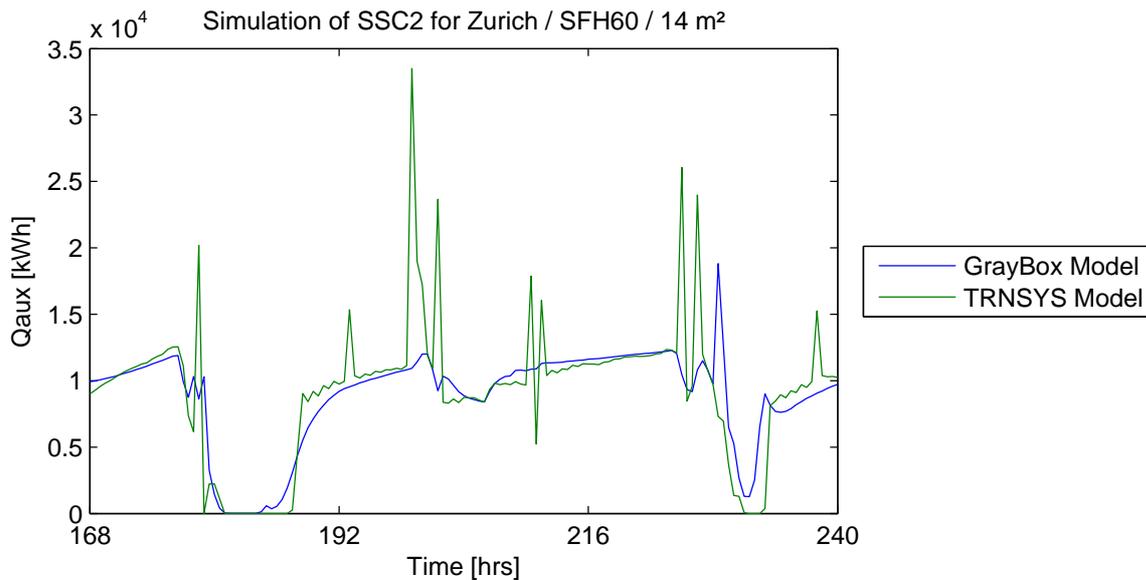


Figure 3-41 Extrait d'une simulation annuelle du SSC2 selon ses modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné (« Boîte Grise »), illustrant l'apprentissage de la consommation de la chaudière.

On remarque cependant une légère dérive des précisions liées à la surface des capteurs (surtout pour les bâtiments SFH100). Ce phénomène est visible sur les estimations d'énergies reçues par les émetteurs (Figure 3-42).

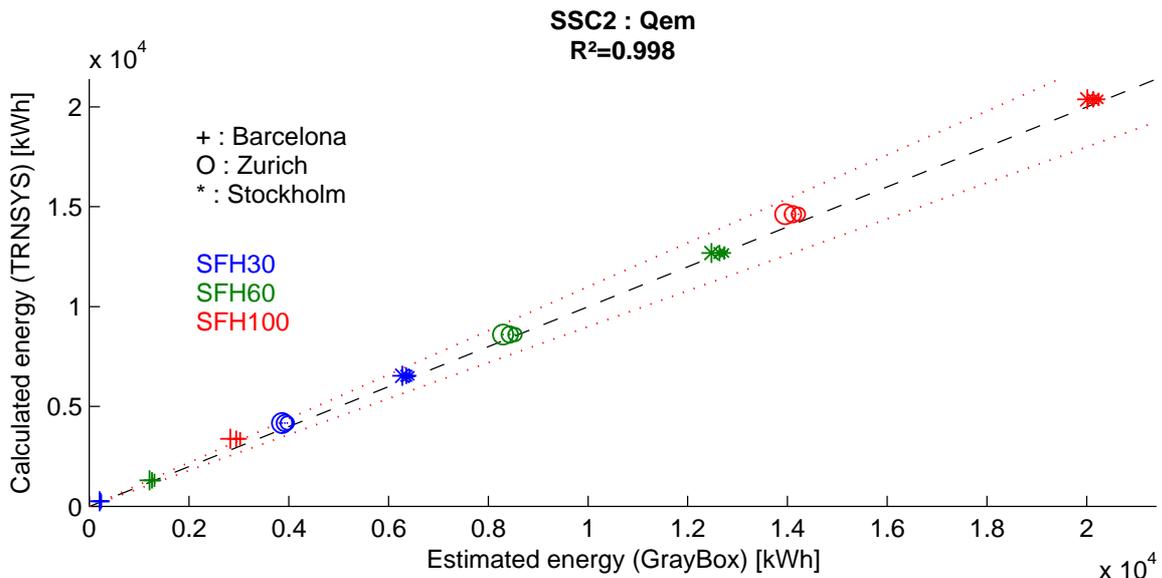


Figure 3-42 Comparaison des énergies fournies aux émetteurs de chaleur dans les 27 simulations de validation, entre les modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné ("Boîte Grise") – cas du SSC2

En fait, ce phénomène est assez similaire à celui observé pour le SSC1 (voir paragraphe 3.3.2.2) mais de manière beaucoup moins prononcée, comme en atteste l'évolution de la température d'air intérieur sur la Figure 3-43.

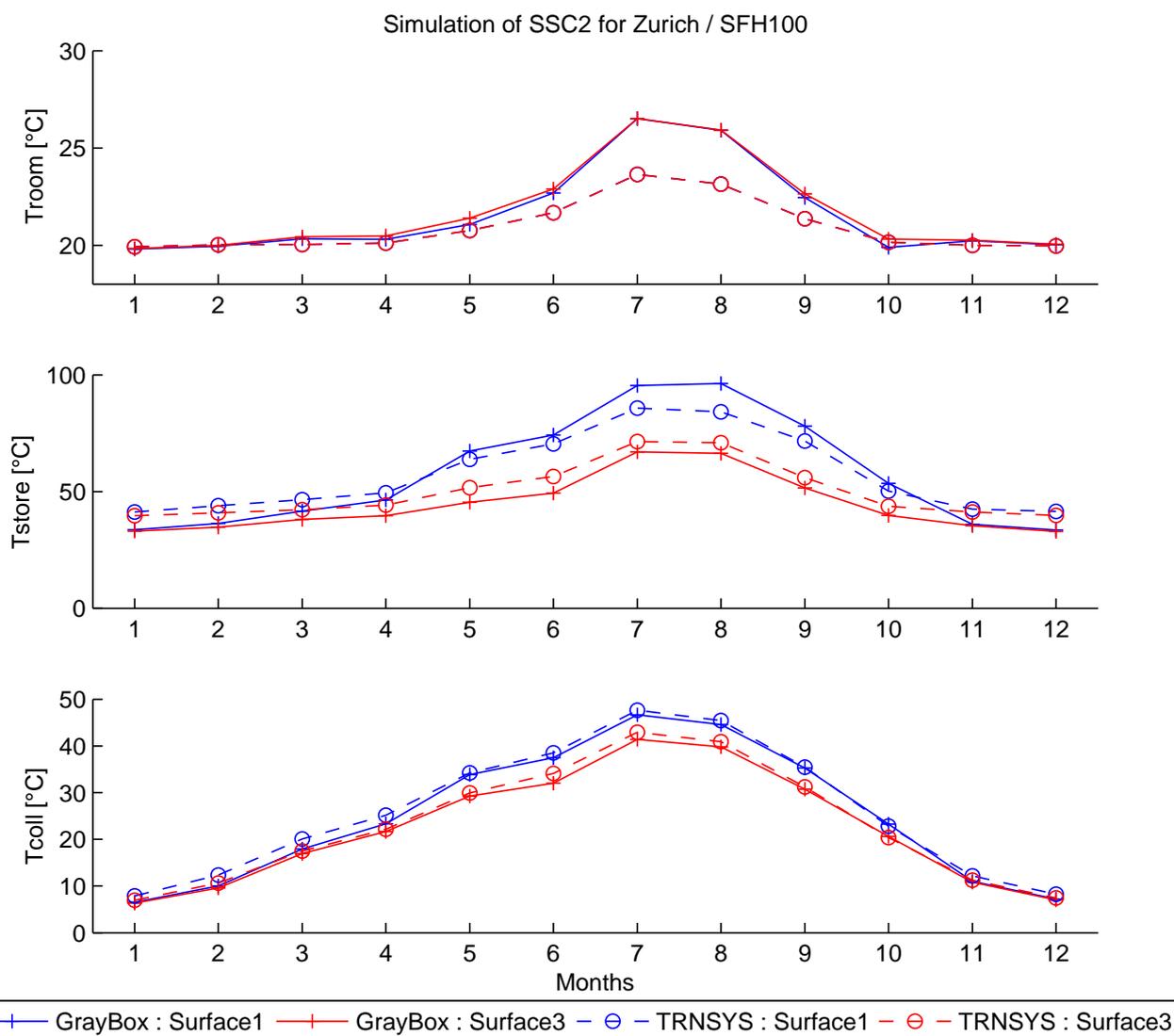


Figure 3-43 Evolutions de la température moyenne mensuelle de l'air intérieur du bâtiment SFH100 chauffé par le SSC2, ainsi que celle du ballon de stockage et des capteurs pour des simulations annuelles du climat de Zurich, selon la surface de capteur considérée

Les observations et hypothèses faites concernant ce phénomène pour le SSC1 restent les mêmes. On peut cependant remarquer que les évaluations de T_{store} sont plus cohérentes avec le SSC2 et que ceci peut éventuellement expliquer le fait que les variations de Q_{em} soient moins prononcées. Néanmoins, aucune conclusion précise ne peut être encore fixée concernant l'origine de ce phénomène.

De la même manière que le SSC1, lors de simulations du fonctionnement du système pour des environnements ayant de forts besoins de chauffage, on observe une certaine « saturation » de la puissance délivrée aux émetteurs de chaleur (Figure 3-44).

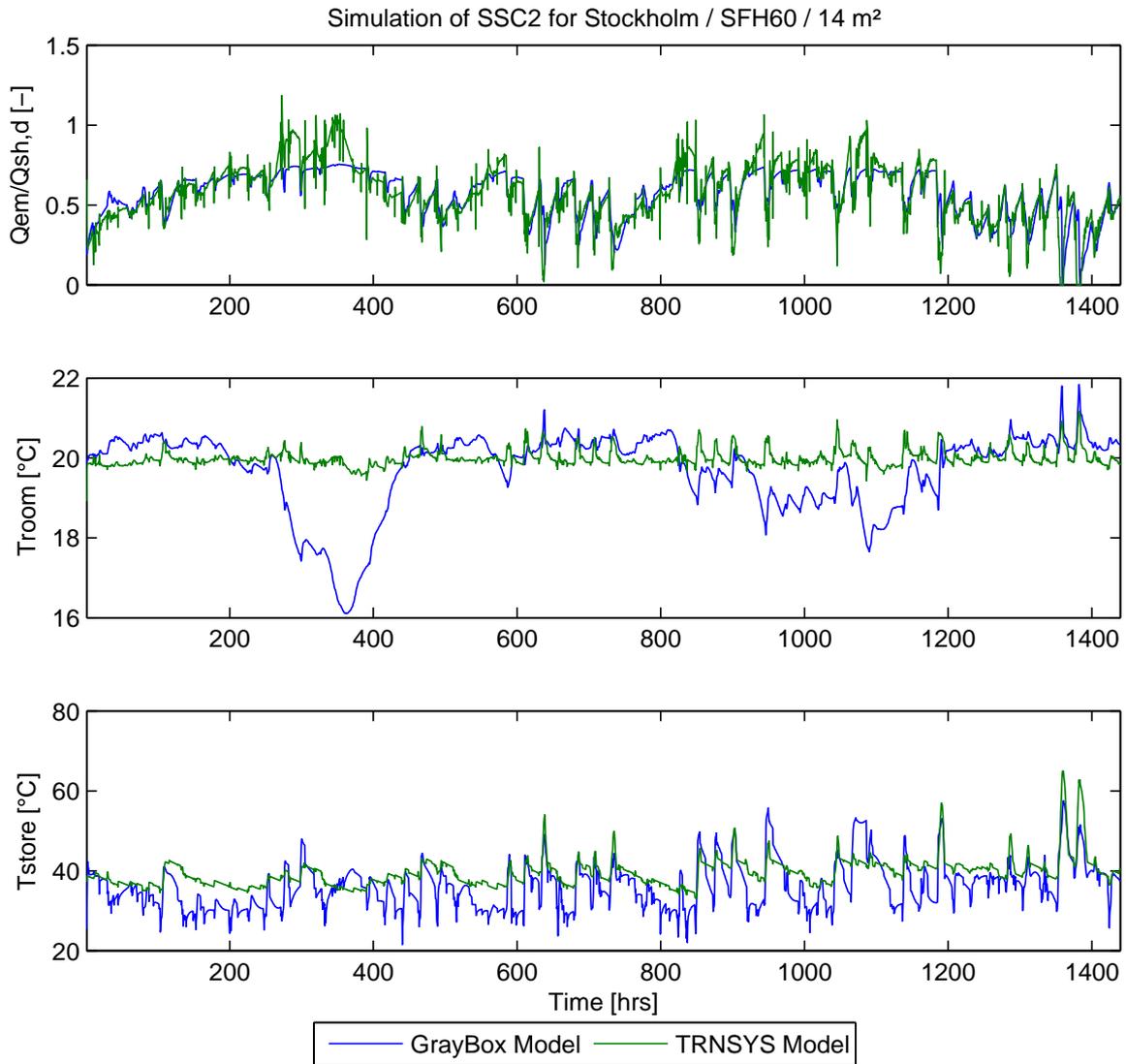


Figure 3-44 Extrait de la simulation annuelle du SSC2 selon ses modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné (« Boîte Grise ») pour le climat de Stockholm, le bâtiment SFH100 et une surface de capteurs de 14m²

La Figure 3-44 montre que lorsque les besoins de chauffage sont très importants, le « taux de sollicitation » des émetteurs de chaleur ($\dot{Q}_{em}/\dot{Q}_{sh,d}$) sur le premier graphique se rapproche souvent de 1 pour les simulations TRNSYS de référence alors qu'il semble ne pas pouvoir monter au dessus de 0,75 pour le modèle « Boîte Grise ». Cette valeur correspond approximativement à la valeur maximale du taux $\dot{Q}_{em}/\dot{Q}_{sh,d}$ lors de la séquence d'entraînement (voir l'évolution du vecteur de régression des sorties et notamment $y(3)$ sur la Figure 3-11). Ce défaut viendrait donc, comme dans le cas du SSC1, d'un manque d'information contenue dans la séquence d'entraînement.

Compte tenu du type de fonctionnement de ce SSC (type B1), les conséquences de ce phénomène sont différentes du cas SSC1. Le manque de puissance délivrée au bâtiment se traduit forcément par une baisse de la température de l'air d'intérieur T_{int} (moins prononcée que dans le cas du SSC1 car la valeur du seuil de saturation de

$\dot{Q}_{em}/\dot{Q}_{sh,d}$ est légèrement plus haute). Cependant, contrairement au SSC1, le modèle « Boîte Grise » du SSC2 sollicite la chaudière d'appoint en lien étroit avec \dot{Q}_{em} et celle-ci ne fournit pas de surplus de chaleur lorsque $\dot{Q}_{em}/\dot{Q}_{sh,d}$ est en « saturation ». La température du ballon de stockage T_{store} n'est donc pas surestimée. Au contraire, il semblerait que celle-ci soit largement sous-estimée et de manière très irrégulière. L'information concernant le contenu énergétique du stockage est ainsi perturbée. Pourtant, ceci ne semble pas avoir de conséquence grave sur l'estimation des autres flux de chaleur. On a déjà pu voir par exemple sur la Figure 3-32 que Q_{coll} était correctement estimé pour les 27 simulations de validation.

Le problème concernant la température maximum du ballon de stockage autorisée par le système, observé pour le SSC1, est également présent ici (Figure 3-45).

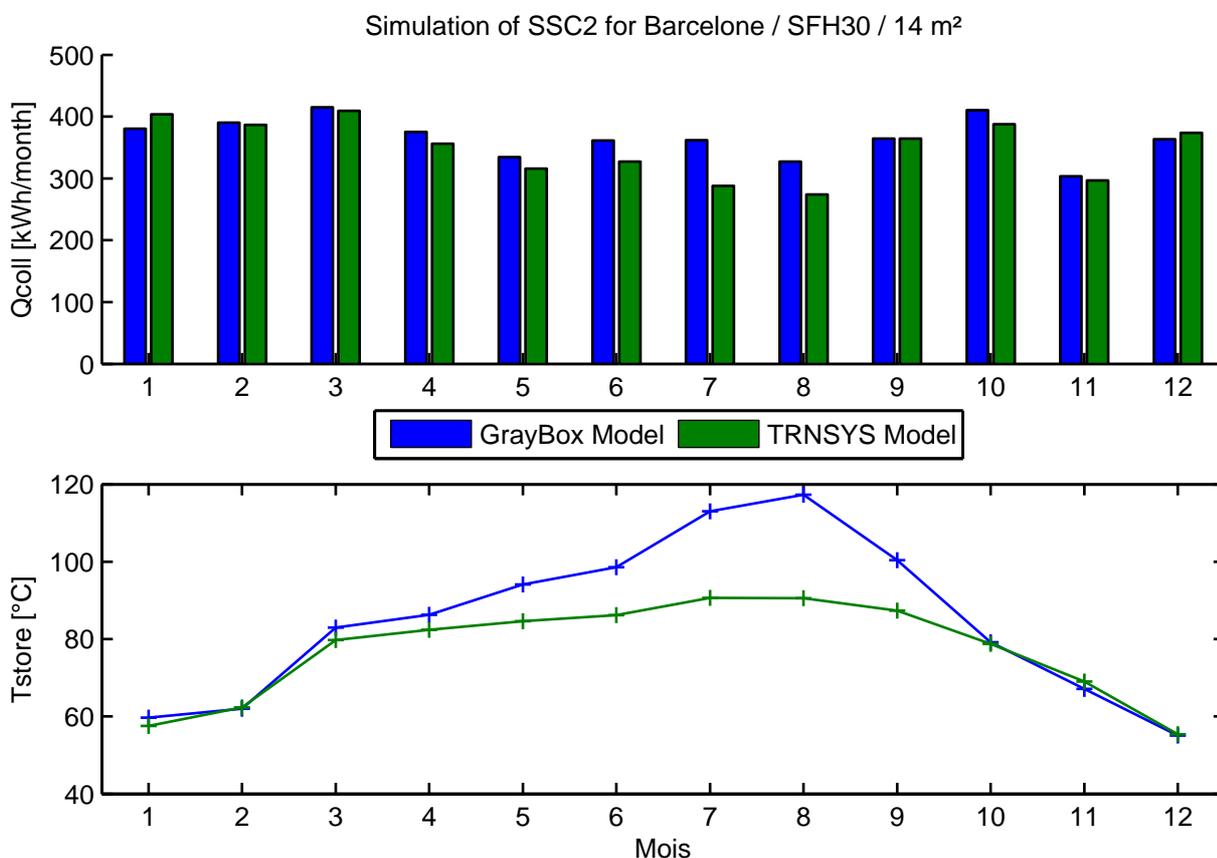


Figure 3-45 Evolution de l'énergie mensuelle récupérée par les capteurs du SSC2 ainsi que celle de la température moyenne mensuelle de son ballon de stockage, pour l'environnement Barcelone/SFH100/20m² de capteurs

Les conséquences sont moindres pour le SSC2 car celui-ci, compte tenu de son fonctionnement, arrive quand même à récupérer beaucoup d'énergie solaire en période estivale, ce qui limite les écarts par rapport aux estimations du modèle « Boîte Grise ».

Malgré les différentes observations faites ci-dessus concernant les quelques soucis de simulation du SSC2 par son modèle « Boîte Grise », l'énergie d'appoint

CHAPITRE 3

consommée est précisément évaluée pour les 27 simulations de validation (voir Figure 3-46).

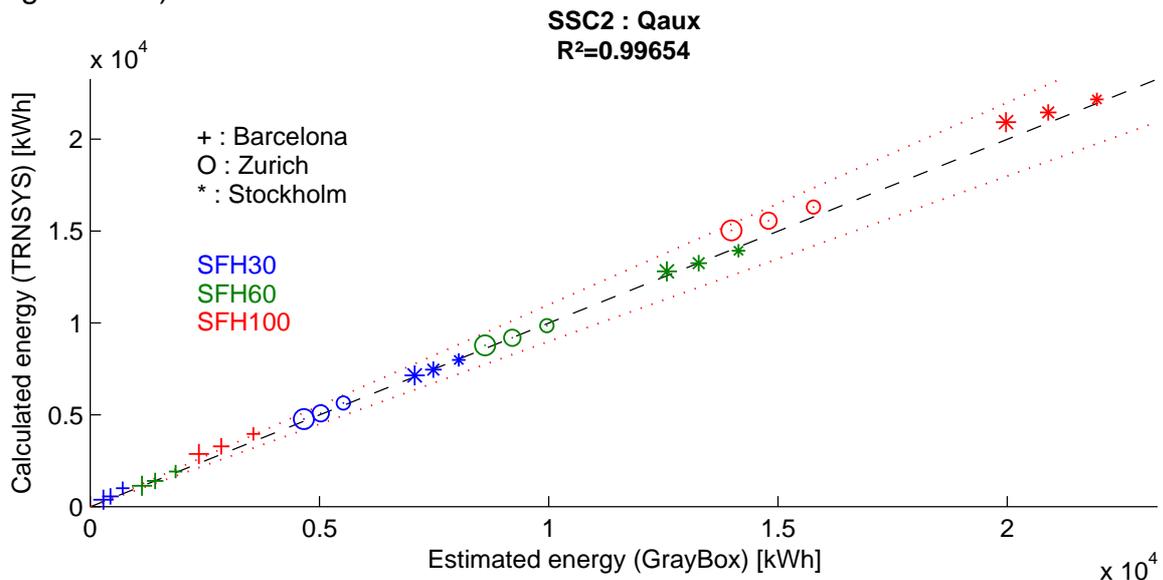


Figure 3-46 Comparaison des énergies consommées par l'appoint, estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS lors des 27 simulations de validation du SSC2

Pour le SSC2, l'utilisation des résultats obtenus par le modèle « Boîte Grise » étudié dans ce paragraphe (modèle ayant un des meilleurs critères MAE_{ref}) et ceux obtenus par le modèle TRNSYS permet de d'établir les courbes caractéristiques suivantes (Figure 3-47).

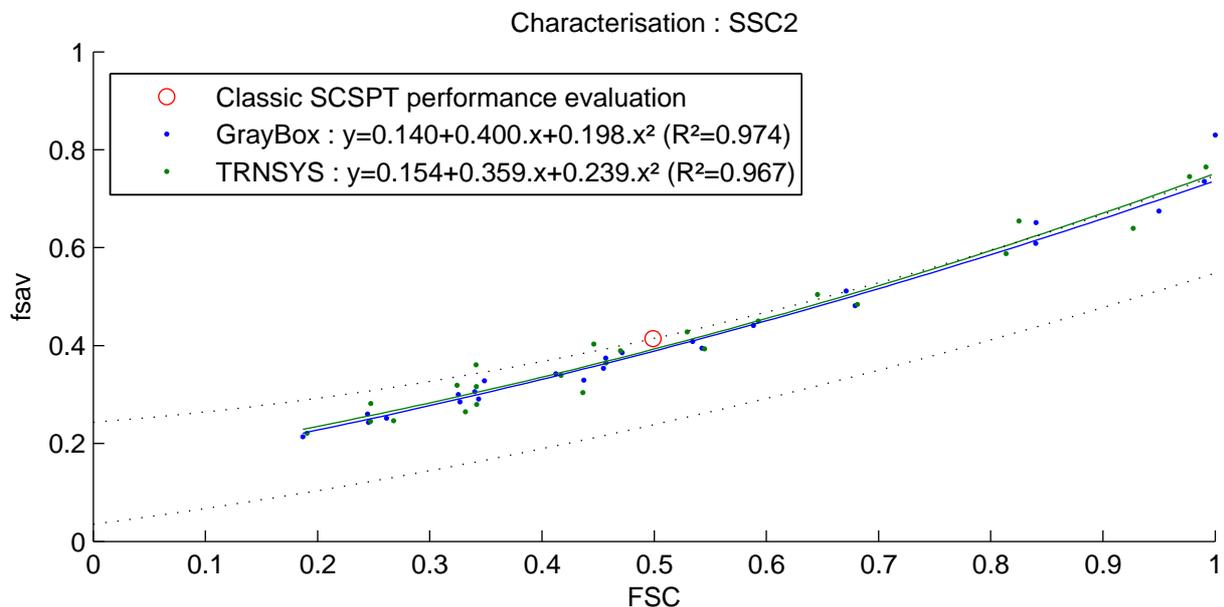


Figure 3-47 Caractérisation du SSC2 à l'aide d'un de ses modèles "Boîte Grise" identifiés et de son modèle TRNSYS

A l'instar du SSC1, la performance évaluée par la méthode SCSPT « classique » est cohérente par rapport aux autres évaluations réalisées par les deux types de modèle du SSC2, ce qui conforte l'ensemble des résultats obtenus.

La caractérisation du SSC2 est quasiment identique quel que soit la méthode utilisée. Les courbes sont pratiquement superposées. Les points $[FSC, f_{sav,th}]$ sont pourtant légèrement différents du fait que les besoins de chauffages ne sont pas exactement les mêmes. On peut en déduire que le modèle « Boîte Grise » a suffisamment bien assimilé le comportement du SSC2 pour retranscrire ses performances de manière très précise.

La caractérisation du SSC2 par la méthodologie proposée est donc également très concluante.

3.3.2.4. Analyse du modèle « Boîte Grise » du SSC3

Le modèle représentant le SSC3 semble être le plus apte à estimer correctement l'énergie reçue par les émetteurs de chaleur aux cours des 27 simulations de validations. La Figure 3-48 montre que, quelle que soit la surface des capteurs considérée dans les simulations, l'estimation de l'énergie reçue par les émetteurs Q_{em} est la même pour un couple « Climat/Bâtiment » donné, contrairement aux autres SSC.

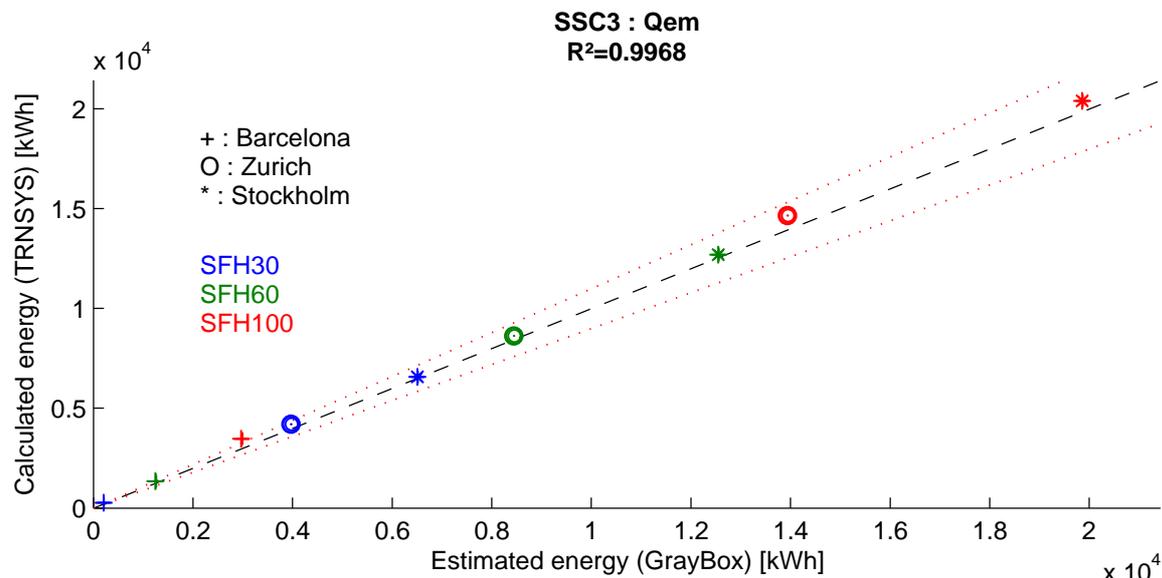


Figure 3-48 Comparaison des énergies fournies à l'émetteur de chaleur dans les 27 simulations de validation, entre les modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné ("Boîte Grise") pour le SSC3

En effet, comme le montre la Figure 3-49 ci-dessous, l'évolution de la température d'air intérieur est la même pour toutes les simulations, indépendamment de la surface des capteurs.

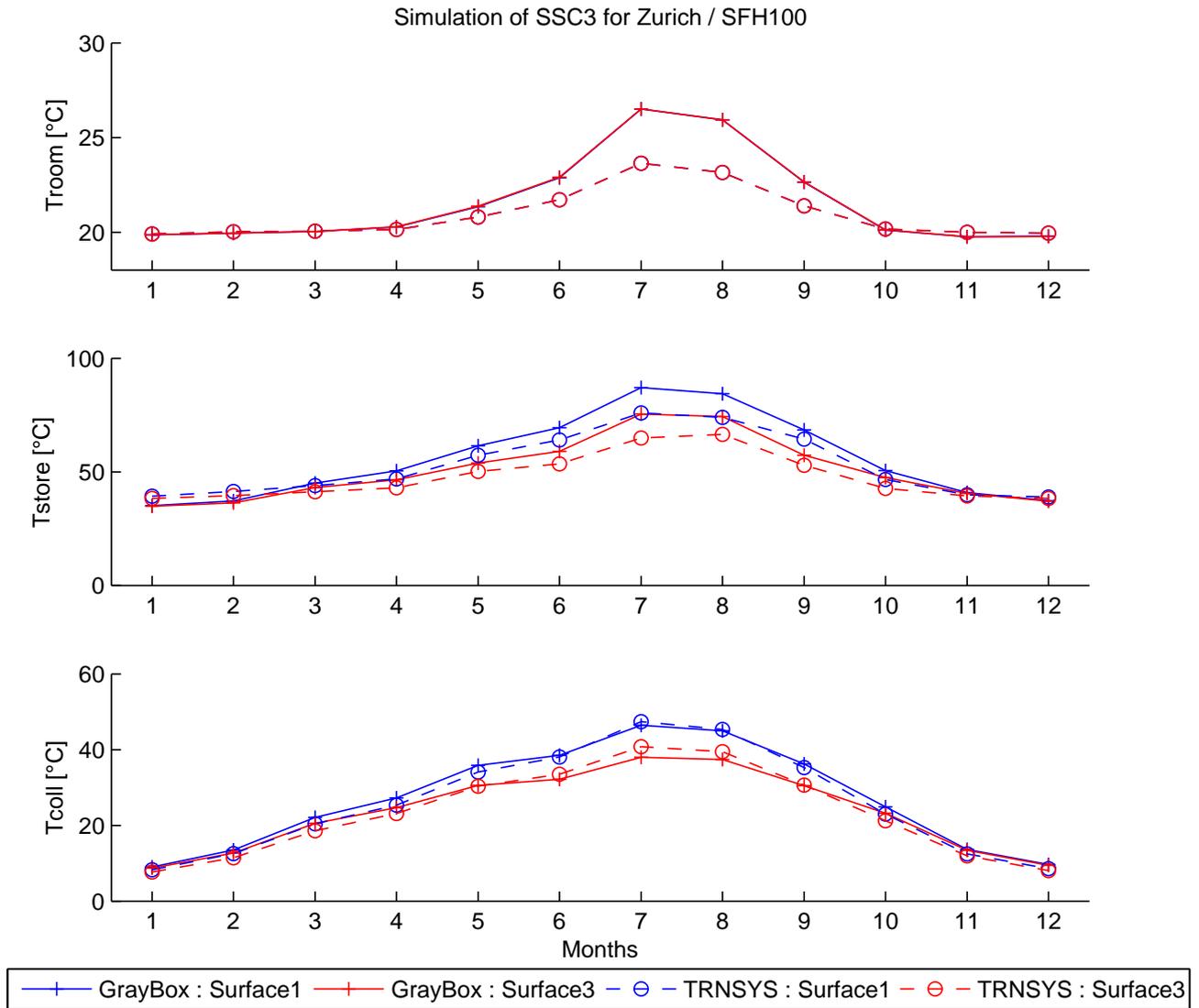


Figure 3-49 Evolutions de la température moyenne mensuelle de l'air intérieur du bâtiment SFH100 chauffé par le SSC3, ainsi que celle du ballon de stockage et des capteurs pour des simulations annuelles du climat de Zurich, selon la surface des capteurs considérée

Encore une fois, rien ne permet de conclure précisément sur l'origine du phénomène observé avec les SSC1 et SSC2 mais on peut, une fois de plus, constater une qualité encore meilleure (même si elle n'est pas parfaite) d'estimation de l'évolution de la température moyenne du ballon de stockage.

On remarque également que lorsque l'environnement de simulation inclut des périodes de fortes demandes pour les besoins de chauffage, le SSC3 n'a aucun souci pour solliciter les émetteurs de chaleur à pleine charge. Comme le montre la Figure 3-50, le taux $\dot{Q}_{em} / \dot{Q}_{sh,d}$ passe même au dessus de 1 lorsque les besoins de chauffage sont importants, en provoquant toutefois quelques instabilités (oscillations rapides de ce signal entre 1 et 0). En conséquence, la température de l'air intérieur T_{int} subit également quelques oscillations mais reste globalement au dessus de sa consigne.

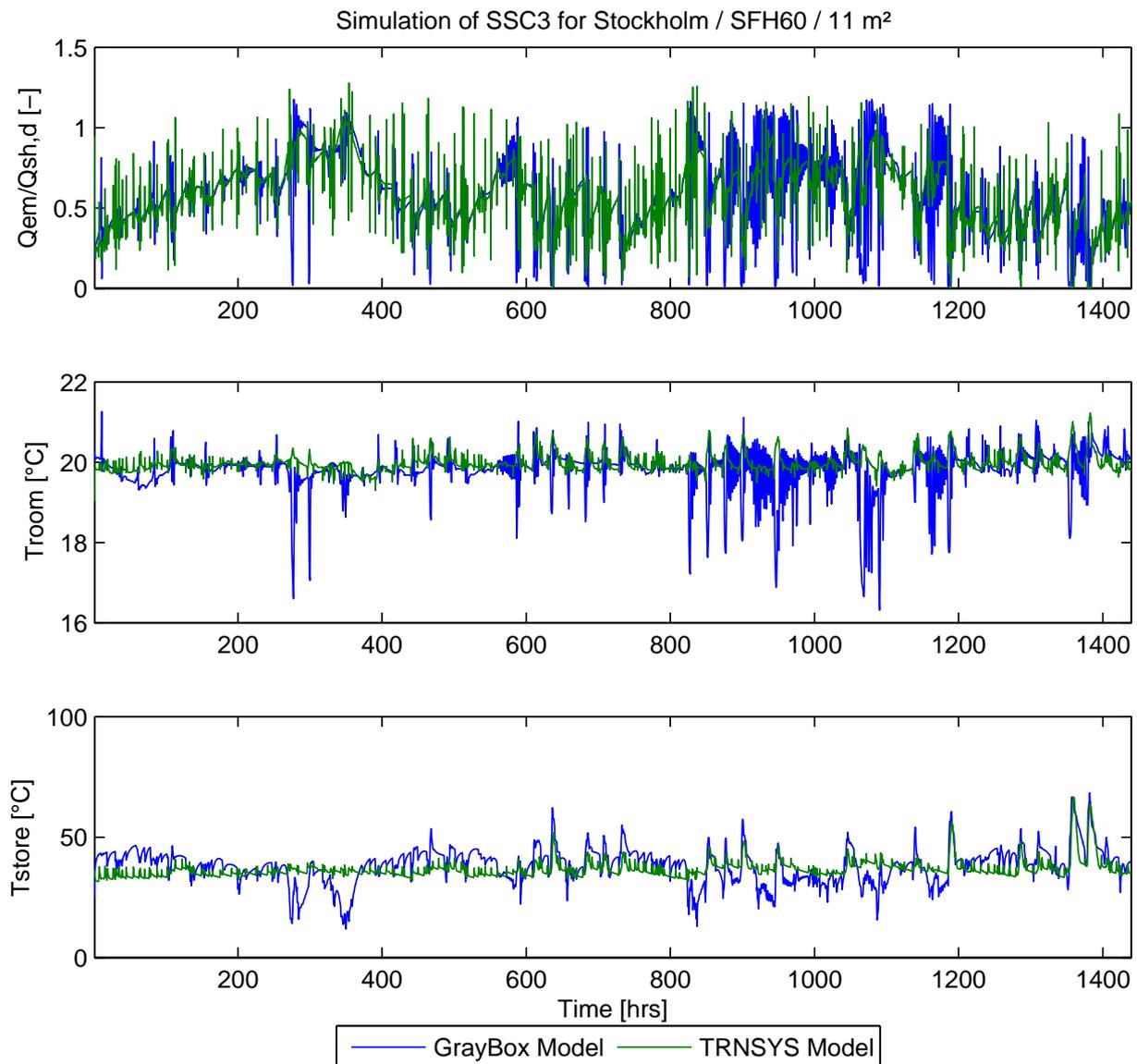


Figure 3-50 Extrait de la simulation annuelle du SSC3 selon ses modèles détaillé (TRNSYS) et entraîné (« Boîte Grise ») pour le climat de Zurich, le bâtiment SFH100 et une surface de capteurs de 14m²

La raison la plus probable pour laquelle il n'y a pas le même phénomène de « saturation » de la puissance fournie aux émetteurs comme dans le cas des deux autres SSC, est que sa séquence d'entraînement intègre quelques périodes, très brèves, où les émetteurs sont sollicités à pleine charge (voir l'évolution du vecteur de régression des sorties et notamment $y(3)$ sur la Figure 3-14). Le modèle « Boîte Grise » ayant déjà été confronté à cette situation pendant son entraînement, il n'a aucun problème pour restituer le comportement du SSC3 en cas de forts besoins de chauffage. Les conditions climatiques sont pourtant les mêmes lors des 12 jours de test pour les trois SSC. Cette particularité de la séquence d'entraînement du SSC3 découle surtout du fonctionnement particulier de ce système : la régulation de T_{int} est moins précise pour ce système et la sollicitation des émetteurs varie beaucoup plus.

CHAPITRE 3

En ce qui concerne l'énergie récupérée par le capteur Q_{coll} , on distingue grâce à la Figure 3-51, deux tendances pour l'estimation de celle-ci, en fonction du type d'environnement énergétique.

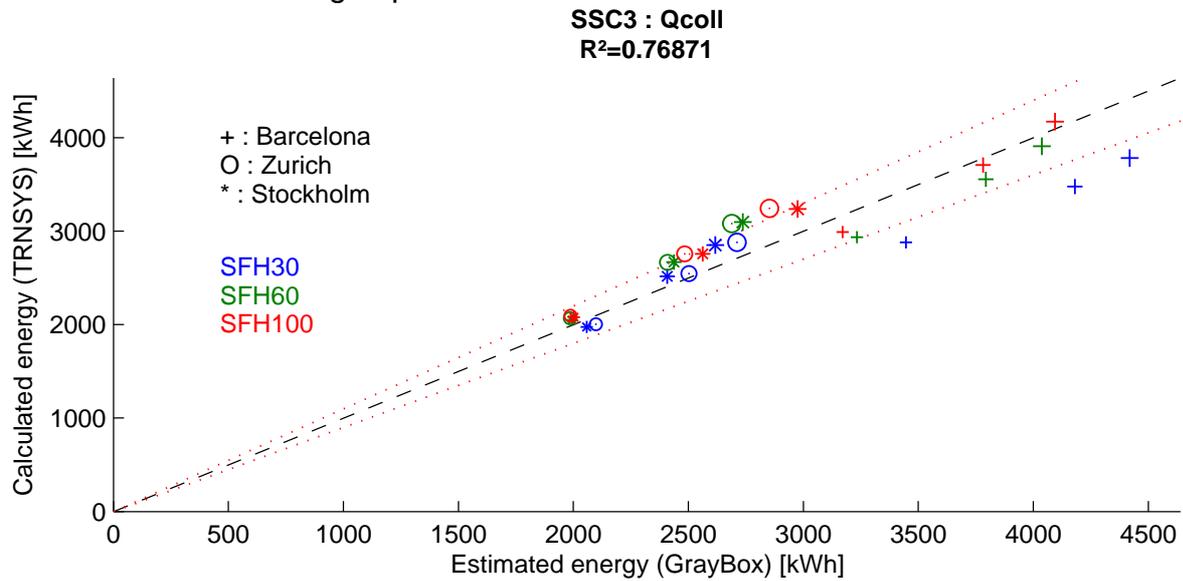


Figure 3-51 Comparaison des énergies récupérées par les capteurs, estimées par le modèle "Boîte Grise" et calculées par le modèle détaillé sous TRNSYS lors des 27 simulations de validation du SSC3

Il semble que pour les environnements climatiques de Zurich ou Stockholm, le modèle de SSC3 sous-estime légèrement Q_{coll} , alors qu'il la surestime pour le climat de Barcelone. Pour ce dernier cas, la raison est la même que celle évoquée pour le SSC1.

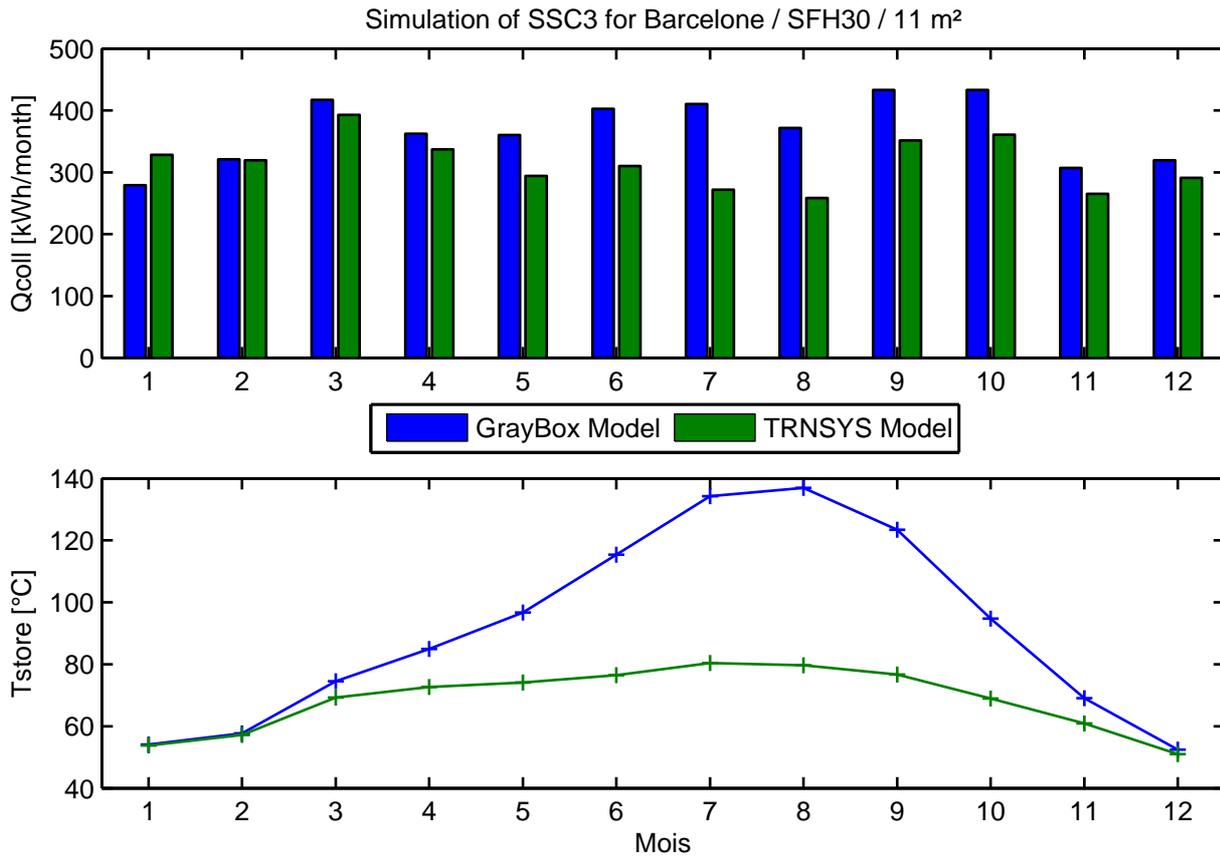


Figure 3-52 Evolution de l'énergie mensuelle récupérée par les capteurs du SSC2 ainsi que celle de la température moyenne mensuelle de son ballon de stockage, pour l'environnement Barcelone/SFH100/20m² de capteurs

La Figure 3-52 montre qu'il y a bien un manque de prise en compte de la température maximum de ballon de stockage autorisée par le système dans les simulations faites par le modèle « Boîte Grise ». L'estimation de Q_{coll} est ainsi trop élevée.

Malgré les observations faites ci-dessus, les consommations en énergie d'appoint sont globalement bien évaluées pour l'ensemble des 27 simulations (Figure 3-53).

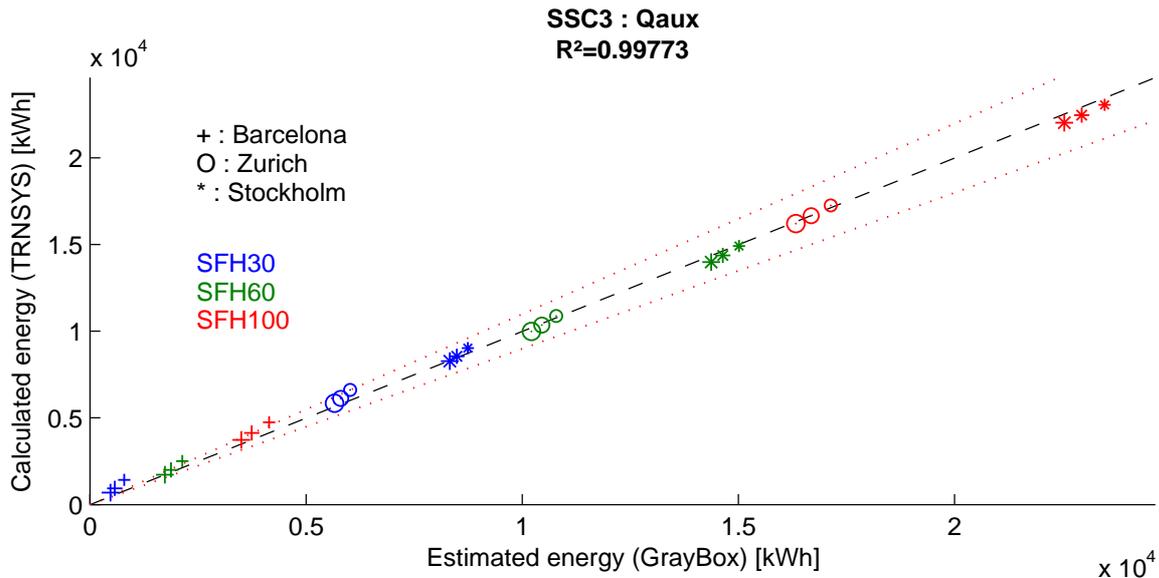


Figure 3-53 Comparaison des énergies consommées par l'appoint dans les 27 simulations de validation, entre le modèle détaillé (TRNSYS) et le modèle entraîné ("Boîte Grise") – cas du SSC3

Les résultats du SSC3 obtenus d'une part, par le modèle « Boîte Grise » étudié dans ce paragraphe (modèle ayant un des meilleurs critères MAE_{ref}) et d'autre part, par le modèle TRNSYS permettent d'établir les courbes caractéristiques suivantes (Figure 3-54).

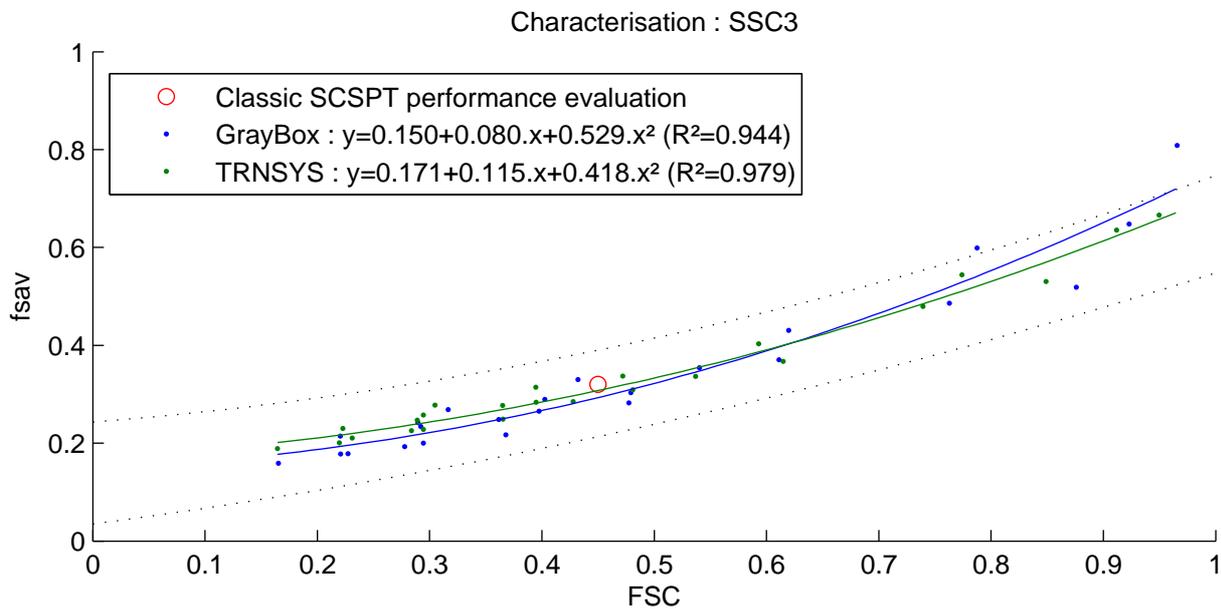


Figure 3-54 Caractérisation du SSC3 à l'aide d'un de ses modèles "Boîte Grise" identifiés et de son modèle TRNSYS

Comme pour les deux autres SSC, la performance évaluée par la méthode SCSPT « classique » est cohérente par rapport aux autres évaluations réalisées par les deux types de modèle du SSC3, ce qui conforte l'ensemble des résultats obtenus.

La caractérisation du SSC3 est assez semblable quelle que soit la méthode utilisée. Les courbes obtenues se croisent pour un FSC proche de 0,6. Le modèle « Boîte

Grise » sur-estime les performances du SSC3 au dessus de point, il les sous-estime pour des FSC inférieur, mais les écarts restent très faibles.

La caractérisation des performances du SSC3 par la méthode FSC semble moins précise que celle des deux autres SSC mais les écarts restant faibles entre les courbes, la caractérisation du SSC3 est aussi globalement satisfaisante.

3.3.3. Bilan

Le bilan de l'expérimentation numérique pour la validation de cette nouvelle approche de test des performances des SSC est très satisfaisant. On peut décliner ce bilan en trois points principaux.

3.3.3.1. Validation de l'approche de modélisation des SSC par « Boîte Grise »

Les résultats présentés dans ce chapitre sont très prometteurs en ce qui concerne l'approche innovante souhaitée pour les futurs tests de performances de SSC. Ils montrent qu'il est possible, pour au moins trois types de SSC ayant des caractéristiques constructives différentes, d'identifier un modèle « Boîte Grise » tel que décrit dans le Chapitre 2 à partir de la séquence de 12 jours de la méthode SCSPT. Ce type de modèle est suffisamment précis pour l'évaluation des énergies annuelles consommées par l'appoint, récupérées par les capteurs et fournies aux émetteurs, pour 27 environnements énergétiques différents.

Les énergies ainsi estimées ont des valeurs très proches de celles calculées par les modèles détaillés des systèmes simulés dans l'environnement TRNSYS. La caractérisation des 3 systèmes testés, quel que soit l'environnement, est donc possible par cette approche : les courbes caractéristiques obtenues, donnant $f_{sav,th}$ en fonction de FSC , sont très proches pour les deux types de modélisation.

3.3.3.2. Points d'améliorations des modèles « Boîte grise »

L'étude réalisée dans ce paragraphe 0 montre également les points forts et les défauts des modèles « Boîte Grise » qui, en faisant l'objet d'études plus approfondies, pourraient certainement améliorer encore la précision de l'estimation des performances des SSC :

- Pour des simulations comportant des passages de forts besoins de chauffage, nous avons observé que le modèle « Boîte Grise » n'était pas capable d'estimer la puissance suffisante \dot{Q}_{em} à fournir aux émetteurs pour répondre à cette charge si sa séquence d'entraînement ne présentait pas de phases de sollicitation des émetteurs à pleine puissance.

- Ce défaut provient d'un manque d'information disponible lors de la séquence d'entraînement. Une légère modification de la séquence de test pourrait remédier à ce problème ; par exemple, en incorporant ou en ajoutant une journée pour laquelle la température extérieure est la plus basse de l'année.

- Nous avons également observé qu'il était assez difficile d'estimer de manière précise l'énergie récupérée par les capteurs Q_{coll} et ce quel que soit le

système et l'environnement. Globalement, une intégration incomplète de la régulation solaire dans le modèle « Boîte Grise », combinée à une évaluation imprécise de T_{store} (qui en plus ne fournit pas d'information à elle seule sur la stratification du ballon) rend difficile l'estimation précise de Q_{coll} . Un exemple souligné dans cette étude pour les environnements à gisement solaire important est que le modèle « Boîte Grise » ne prend pas en compte les fonctions de régulation généralement intégrées dans les SSC de protection du ballon contre les températures excessives (celui-ci calcule des puissances récupérées par les capteurs solaires alors que la température du ballon de stockage est bien trop importante, même au-dessus de 100°C).

- La régulation du circuit capteur n'est donc pas complètement intégrée dans le modèle « Boîte Grise ». La séquence de test « 12 jours » ne présente pas de jours extrêmes en termes d'ensoleillement et ne sollicite pas toutes les fonctions de contrôle comme les protections anti-surchauffe du ballon par exemple. Des informations complémentaires, issues éventuellement d'une séquence de test plus longue pourrait atténuer ce souci de modélisation. Il serait également possible d'envisager d'autres composantes du vecteur de régression des entrées, plus proches des régulations standards des capteurs (en comparant T_{store} à certaines valeurs particulières par exemple). Un modèle de ballon de stockage multi-nodal pourrait également enrichir la représentation d'état du système pour améliorer l'estimation de Q_{coll} mais un tel modèle est très difficile à établir sans un paramétrage complexe nécessitant des mesures et tests particuliers sur le ballon.

- Il ressort également de cette étude que la facilité d'entraîner et de sélectionner un bon modèle, ainsi que la qualité de généralisation des modèles, dépendaient du type de SSC et de son fonctionnement. Il semblerait que cela vienne principalement du fonctionnement de la chaudière et de la qualité d'estimation de la température moyenne du ballon de stockage T_{store} . Compte tenu des observations faites sur la partie « Boîte Blanche » des modèles globaux de SSC dans le Chapitre 2, on peut se demander si les modèles simplifiés choisis pour la chaudière d'appoint et le ballon de stockage ne pénalisent pas certains types de SSC, notamment lorsque la chaudière a un fonctionnement saccadé.

- La modélisation « simplifiée » de l'appoint et du ballon de stockage dans la partie « Boîte Blanche » étant imprécise, il serait peut être envisageable d'adopter une autre forme de modélisation que la représentation d'état pour intégrer l'aspect gestion du stockage (voir le paragraphe 2.1.1.3 pour les différents aspects de la modélisation à partir de données expérimentales). Du point de vue de l'architecture du modèle « Boîte Grise », une solution pourrait être d'intégrer en entrée du réseau de neurones ses sorties retardées pour remplacer l'état T_{store} (voir Figure 3-55). Le vecteur d'état restant ne représenterait plus que l'état des besoins de chauffage et de l'énergie solaire disponible (soit l'environnement du SSC). L'avantage serait de ne pas avoir à utiliser de modèles trop simplifiés et de ne pas avoir à estimer les paramètres du

stockage et de l'appoint. Par contre cela ajouterait des entrées supplémentaires au réseau, et ne serait donc pas en faveur de sa parcimonie (voir les principes de modélisation par réseau de neurones dans le paragraphe 2.1.3.2).

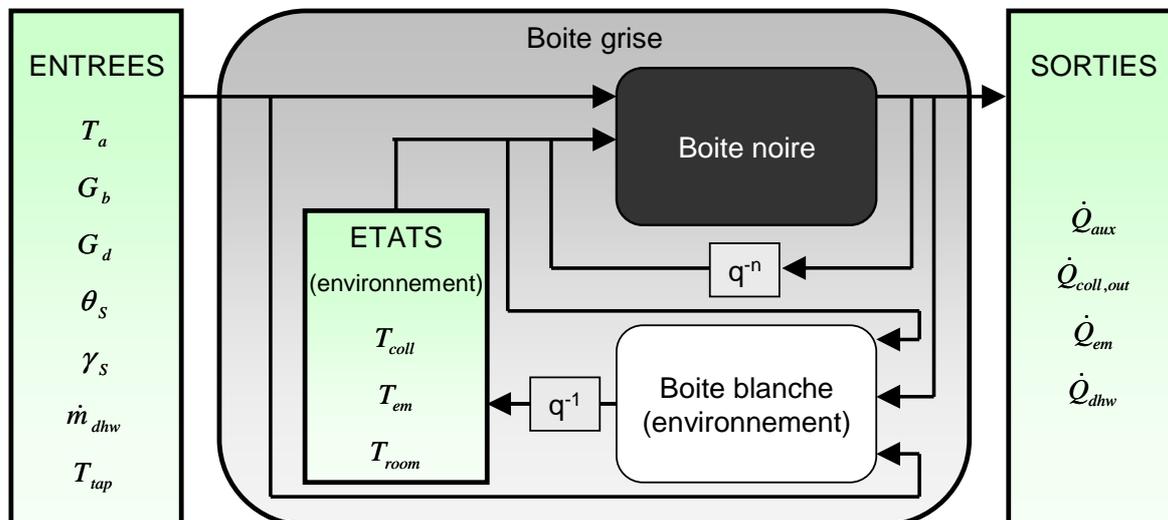


Figure 3-55 Schéma du modèle global de SSC envisagé

3.3.3.3. Etape de traitement des informations nécessaire

L'expérimentation numérique de la méthode proposée a souligné le fait que le processus mis au point dans le paragraphe 2.3.3, en l'état actuel, peut entraîner et sélectionner de très bons modèles « Boîte Grise » pour caractériser les SSC mais qu'il n'est ni capable de déterminer un modèle unique représentant le SSC testé, ni capable de proposer un modèle toujours satisfaisant. En effet, la fonction de coût à optimiser pour entraîner les réseaux de neurones est très complexe et l'étape de validation et de sélection proposée actuellement (voir le test en « Boucle Fermée » du paragraphe 2.3.3.2) n'est pas assez puissante pour discriminer correctement les modèles. Dans le cas de tests réels (voir CHAPITRE 4), ce point est assez gênant puisqu'aucune donnée ne permet de garantir la qualité d'un modèle, excepté la comparaison entre les besoins de chauffage de référence et l'estimation de l'énergie fournie aux émetteurs qui peut révéler les calculs douteux. La séquence d'entraînement ne pouvant être raccourcie pour extraire des données de validation, une solution envisageable serait d'ajouter, si possible, une journée à la séquence de test qui ferait office de réelle séquence de validation.

Néanmoins, il faut tout de même remarquer que la majorité des réseaux obtenus par les différentes procédures engagées permet d'estimer convenablement la consommation d'énergie d'appoint des SSC testés pour de nombreux environnements différents (voir Figure 3-56, Figure 3-57 et Figure 3-58, pour lesquelles une couleur correspond à un modèle neuronal différent).

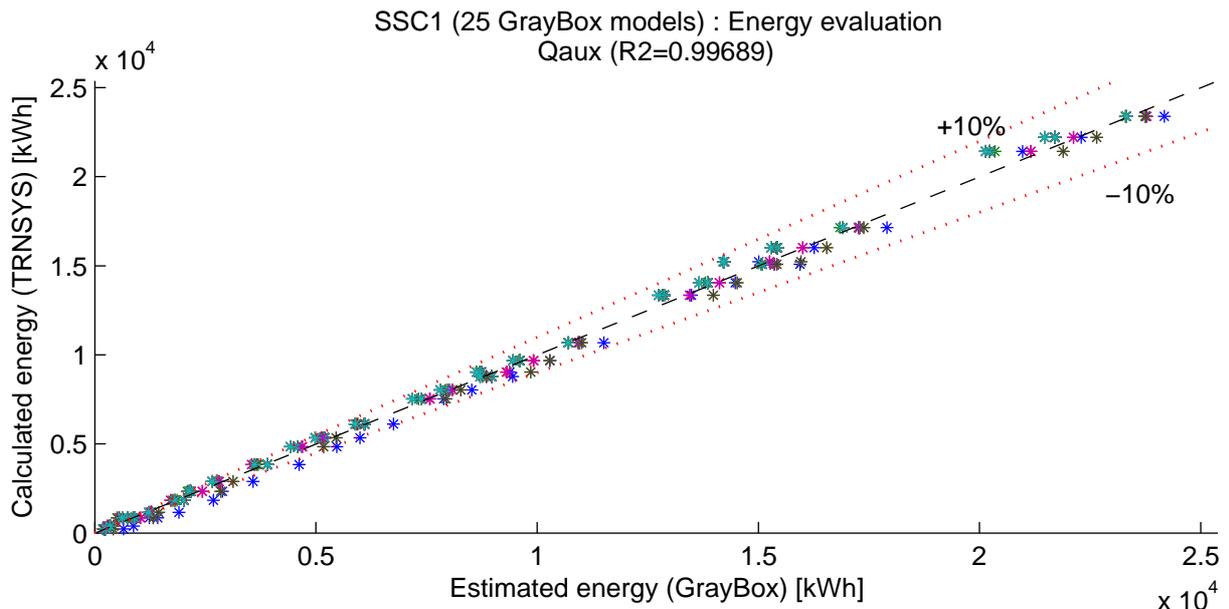


Figure 3-56 Comparaison des énergies consommée par l'appoint du SSC1 dans les 27 simulations de validation, entre le modèle détaillé (TRNSYS) et 25 modèles entraînés ("Boîte Grise") présentant un bon coefficient MAEref

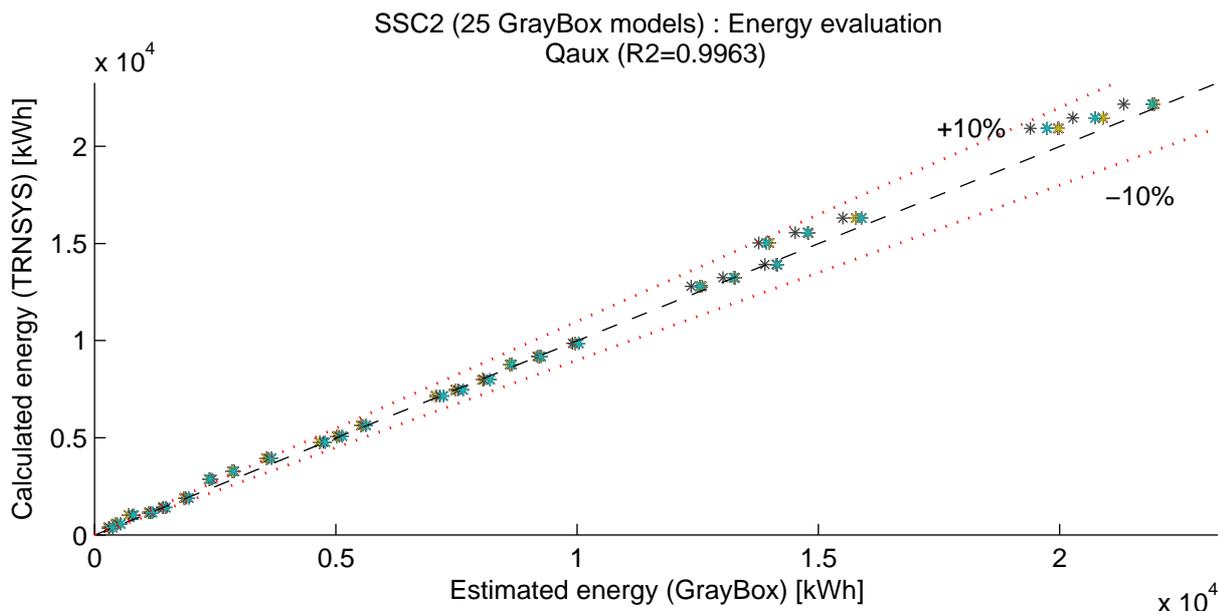


Figure 3-57 Comparaison des énergies consommée par l'appoint du SSC2 dans les 27 simulations de validation, entre le modèle détaillé (TRNSYS) et 25 modèles entraînés ("Boîte Grise") présentant un bon coefficient MAEref

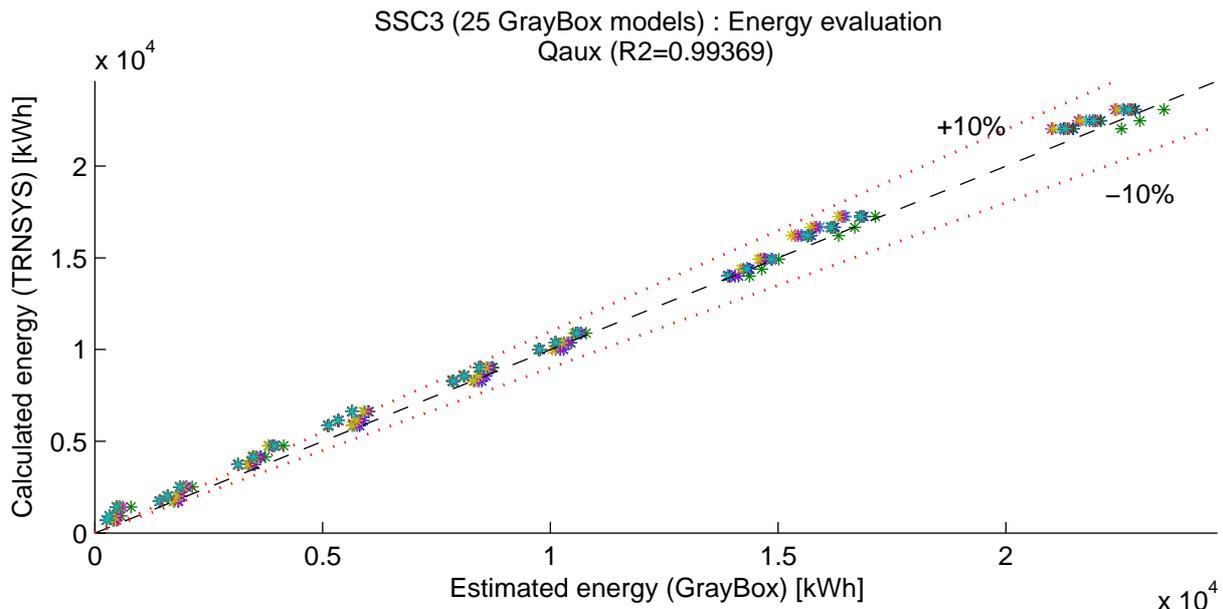


Figure 3-58 Comparaison des énergies consommée par l'appoint du SSC3 dans les 27 simulations de validation, entre le modèle détaillé (TRNSYS) et 25 modèles entraînés ("Boîte Grise") présentant un bon coefficient MAEref

Quel que soit le SSC testé, les estimations de Q_{aux} sont assez précises pour les 25 modèles retenus : le coefficient de régression statistique obtenu avec l'ensemble des résultats est à chaque fois supérieur à 0,99. Compte tenu que le type de SSC influence la facilité de la procédure de sélection à déterminer un bon modèle « Boîte Grise » (voir le paragraphe 3.3.3.2), les estimations sont plus dispersées pour le SSC1 et le SSC3. Ceci influence l'allure générale des courbes FSC obtenues avec chacun de ces modèles pour un même SSC (voir Figure 3-59, Figure 3-60 et Figure 3-61).

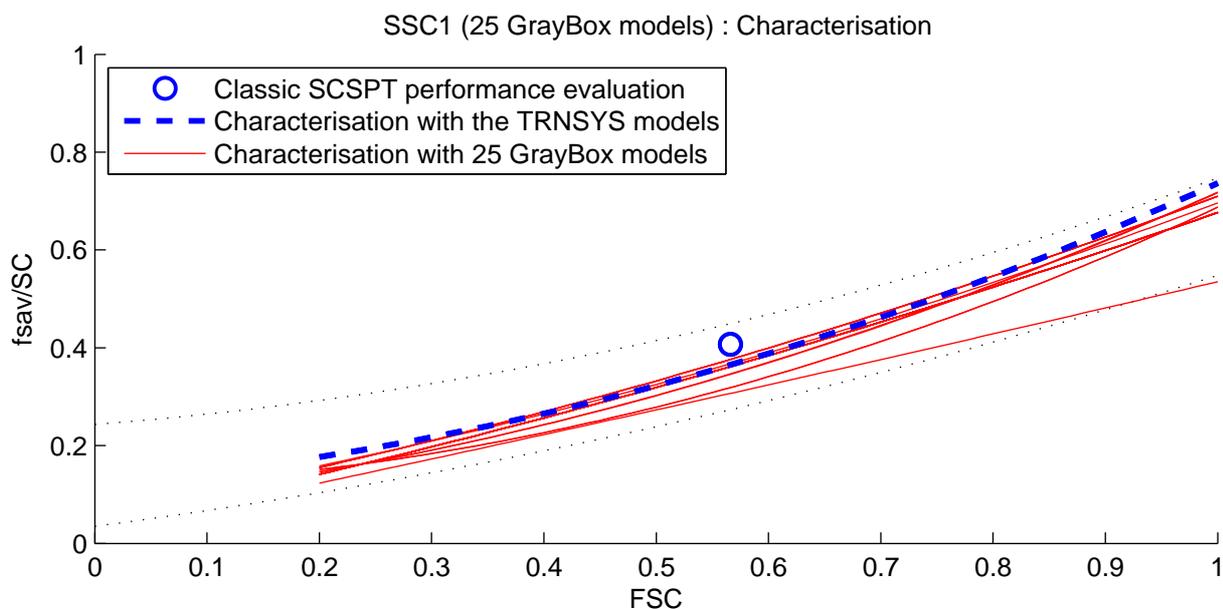


Figure 3-59 Caractérisation du SSC1 à l'aide de 25 modèles "Boîte Grise" présentant un bon coefficient MAEref et de son modèle TRNSYS

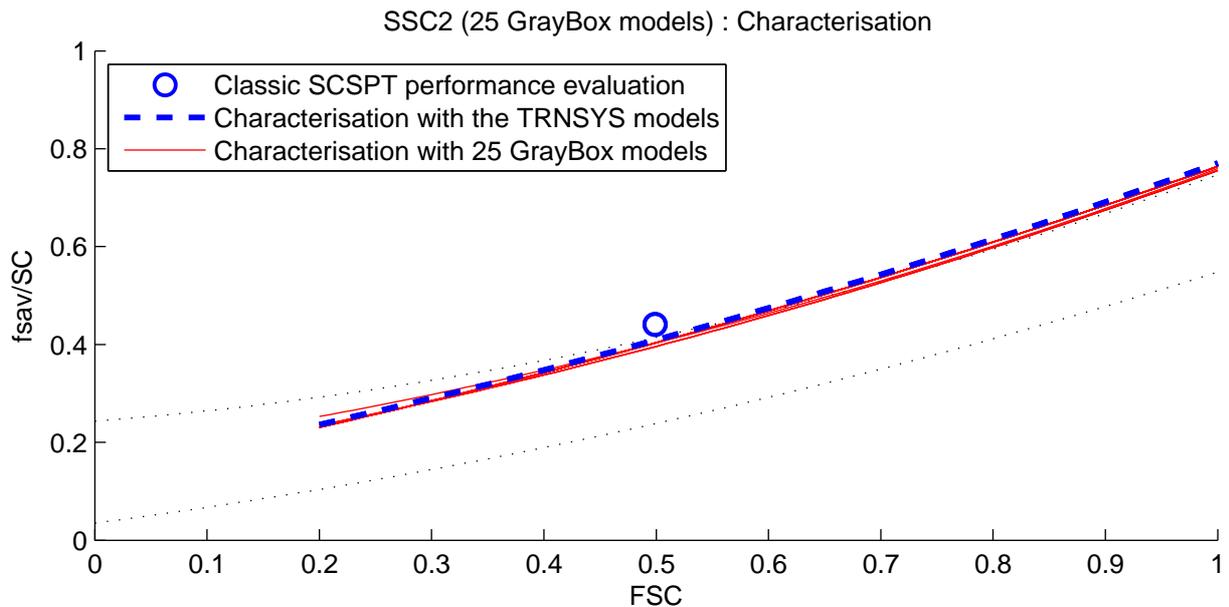


Figure 3-60 Caractérisation du SSC2 à l'aide de 25 modèles "Boîte Grise" présentant un bon coefficient MAEref et de son modèle TRNSYS

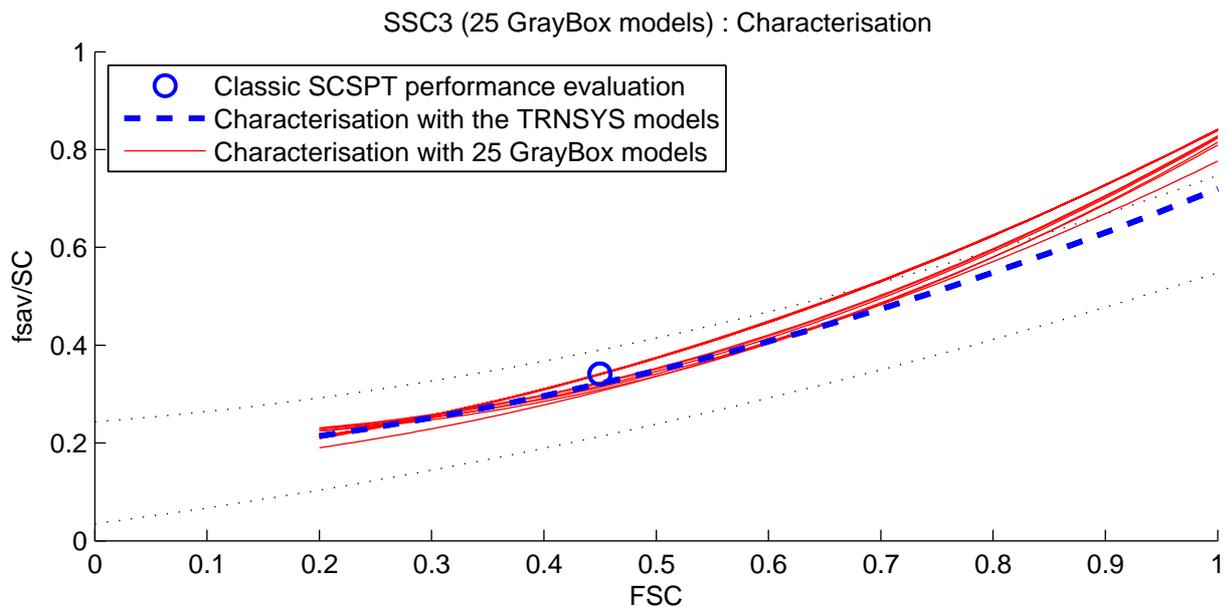


Figure 3-61 Caractérisation du SSC1 à l'aide de 25 modèles "Boîte Grise" présentant un bon coefficient MAEref et de son modèle TRNSYS

Les modèles « Boîte Grise » du SSC2 caractérisent tous ce système de la même manière. Toutes les courbes sont quasiment confondues et sont très proches de la courbe obtenue avec le modèle TRNSYS. Pour les autres SSC, les courbes des 25 modèles retenus sont un peu plus dispersées mais, mise à part quelques exceptions pour le SSC1, elles traduisent toutes une tendance générale assez proche de la courbe de référence établie à partir de simulations détaillées sous TRNSYS.

Au vu de ces résultats, il serait peut être envisageable de garder la même procédure d'entraînement de réseaux et de sélection de modèles « Boîte Grise » mais, au lieu de tenter de proposer un modèle unique du SSC testé, l'idée serait plutôt de travailler avec plusieurs de ces réseaux entraînés. En analysant et en traitant leurs résultats ensemble, des informations plus mitigées mais globalement satisfaisantes pourraient

être disponibles à chaque lancement de la procédure. Beaucoup de solutions de traitement des données pourraient être envisagés comme par exemple exclure les modèles présentant des résultats aberrants dans un premier temps et combiner les sorties des autres réseaux, soit sur de longues périodes (moyennes des énergies mensuelles estimées par chacun des réseaux), soit à chaque pas de temps (la structure finale pour la simulation du système testé pourrait être dans ce cas celle représentée par la Figure 3-62).

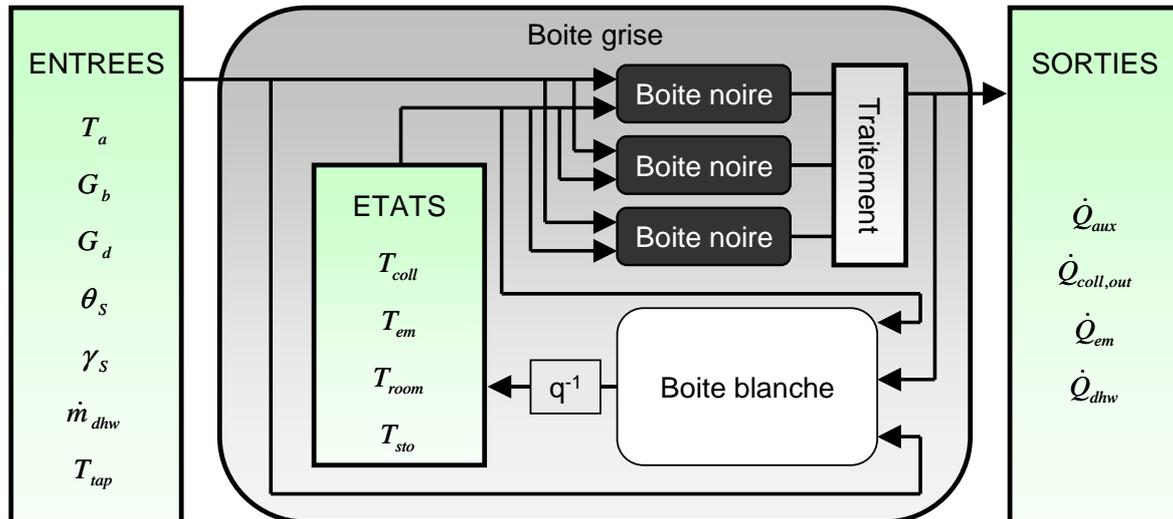


Figure 3-62 Exemple de structure de modèle « Boîte Grise » à envisager pour la simulation d'un SSC, basée sur l'analyse et le traitement des sorties de plusieurs réseaux de neurones entraînés

3.4. Conclusion du chapitre

Cette partie expérimentation numérique a permis de valider la méthodologie proposée dans le cadre de ces travaux de recherche, c'est-à-dire la modélisation de type « Boîte Grise » des SSC à partir de leur test « 12 jours » selon la méthode SCSPT. Les performances des SSC peuvent ainsi être caractérisés quel que soit leur environnement énergétique.

Trois modèles détaillés de SSC sous TRNSYS ont été simulés dans les conditions de la séquence de test SCSPT. Leurs résultats ont permis de définir des modèles « Boîtes Grises » correspondants. Les simulations annuelles de ces mêmes modèles détaillés de SSC, pour 27 environnements différents, ont servi comme données de validation des modèles « Boîte Grise » identifiés. Pour comparer les résultats, des critères de validation ont été mis en place et permettent de juger de la qualité d'estimation et de généralisation de chacun des modèles entraînés.

Les résultats sont très convaincants. Pour les trois SSC testés, la modélisation globale « Boîte Grise » de leur fonctionnement à partir de la séquence de 12 jours est possible, ce qui est très prometteur pour l'approche envisagée. Les différentes énergies estimées par les deux types de modèles pour les 27 simulations sont très proches. Les modèles « Boîtes Grises » semblent suffisamment précis pour pouvoir caractériser les performances des SSC pour tout environnement énergétique.

Une analyse détaillée des résultats montre les points forts et des points pouvant être améliorés pour obtenir une méthodologie complète et fiable de caractérisation des performances. Ces points concernent surtout quelques aspects de la structure du modèle « Boîte Grise » et la procédure d'entraînement des réseaux de neurones et la sélection d'un modèle final. Des pistes de recherche sont évoquées dans cette partie mais n'ont pu faire l'objet de travaux supplémentaires dans ce cadre.

La procédure actuelle, telle que présentée dans les Chapitre 2 et 3 et jugée satisfaisante, est finalement appliquée à des cas réels dans le Chapitre suivant.

CHAPITRE 4. Exploitations d'expérimentations réelles pour l'application de la nouvelle approche

Résumé du chapitre

L'expérimentation numérique présentée dans le Chapitre 3, basée sur des tests de modèles numériques détaillés de SSC, a montré que l'approche envisagée pour pouvoir caractériser les performances des SSC à partir de la séquence de test SCSPT était pertinente. L'expérimentation réelle présentée dans ce chapitre permet d'apprécier l'application concrète de cette nouvelle méthodologie.

Le protocole expérimental de test de SSC sur le banc d'essai semi-virtuel proposé et appliqué pour cette étude, est d'abord présenté. Il pose également un cadre et une démarche pour le traitement des données expérimentale afin d'identifier des modèles « Boîte Grise » des SSC testés selon la méthode de caractérisation élaborée dans le cadre de ces travaux.

Deux SSC réels ont ainsi pu être étudiés de cette manière. La mise en œuvre expérimentale de la méthode soulève quelques remarques sur les conditions d'essai et sur une partie de la modélisation envisagée. Les modèles « Boîte Grise » identifiés à partir des données issues des tests sont analysés en détail et utilisés pour réaliser une caractérisation complète des deux systèmes testés.

4.1. **Protocole de test et de caractérisation des SSC**

Pour tester la nouvelle approche de caractérisation des performances des SSC que nous avons élaborée et évaluer sa mise en œuvre concrète, des essais ont pu être réalisés sur des systèmes réels. Deux SSC, préalablement testés selon la méthode SCSPT classique (voir paragraphe 1.2.2), ont été mis à notre disposition pour réaliser plusieurs séries d'expérimentations (voir les paragraphes 4.2 et 4.3).

Le protocole général de réalisation d'un test ainsi que celui de traitement des données est présenté dans cette partie.

4.1.1. **Caractéristiques techniques du banc d'essai semi-virtuel**

Le banc d'essai semi-virtuel situé dans les locaux de l'INES a été utilisé pour tester les SSC selon la méthodologie proposée. Le principe de fonctionnement de ce banc d'essai est décrit dans le paragraphe 1.2.2.1.

Les caractéristiques techniques du banc d'essai sont les suivantes :

- Une cellule de test permet d'accueillir le système à installer ainsi que tout l'équipement nécessaire aux essais. La température d'air de la cellule est maintenue à 18°C.

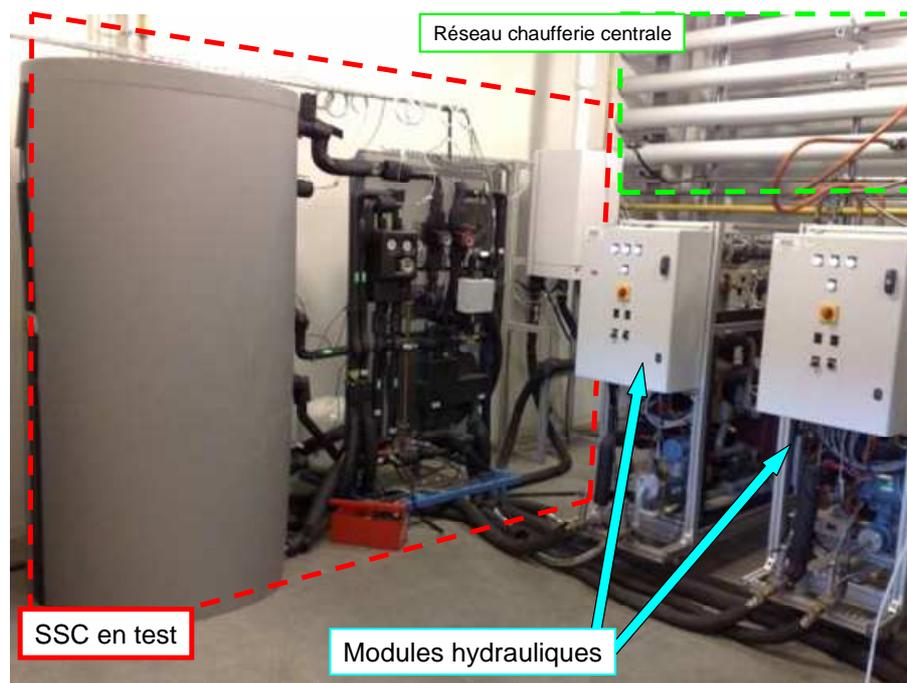


Figure 4-1 Photo d'une cellule de test à l'INES

L'ensemble des composants du SSC à tester (sauf les capteurs et les émetteurs de chaleur) y est installé et connecté, comme si le SSC était installé dans un bâtiment « réel ». Un module émulateur est connecté à chacun des circuits hydrauliques du système : circuit solaire, circuit de chauffage, circuit ECS et si nécessaire circuit du système d'appoint. Pour produire ou consommer de la chaleur au fur et à mesure des besoins simulés par l'essai, les modules sont alimentés par deux réseaux de distribution d'eau chaude et d'eau froide.

CHAPITRE 4

- Une « chaufferie centrale » alimente des circuits d'eau surchauffée et d'eau glacée. Elle est composée de :
 - Un système refroidisseur de 150kW capable de produire de l'eau à -12°C, connecté à un réservoir de 5000L pour stabiliser la température dans le réseau de distribution ;
 - Une chaudière électrique de 54kW capable de produire de l'eau à 180°C.
- Des modules 25kW émulent à la fois charge et décharge thermique (selon la configuration de l'installation, mais aussi selon la période de la séquence d'essai) sur tous les circuits du système (sauf le circuit ECS). Quatre modules de ce genre sont disponibles. Leurs caractéristiques sont :
 - Plage de température : de -10 à 170°C ;
 - Plage de débit mesurable : de 100L/h à 3600L/h ;
 - Puissance maximum de 25kW avec une différence de 10K entre les circuits primaire et secondaire.



Figure 4-2 Photo d'un module 25kW

- Un module 50kW est adapté à l'émulation du puisage en ECS. Le module est composé d'une partie dédiée au conditionnement de l'eau froide, qui est ensuite stockée dans un réservoir de 100L. L'autre partie assure le réglage des débits de puisage.
 - Plage de température pour l'eau froide : de 2 à 25°C ;
 - Plage de débit pour le puisage : de 1 à 64L/mn.



Figure 4-3 Photo du module 50kW

- Une armoire électrique d'acquisition et de contrôle/commande équipe chaque module hydraulique. Elle permet de :
 - Enregistrer les températures (via des sondes PT100) ;
 - Enregistrer les débits (via des débitmètres de type Coriolis ou de type électromagnétique selon les modules) ;
 - Commander les pompes et vannes de chaque module.

Une armoire électrique supplémentaire installée dans la cellule de test assure :

- Le comptage de l'énergie électrique consommée par les auxiliaires du système testé;
- Le comptage de l'énergie électrique consommée par l'éventuel système d'appoint ;
- L'émulation des sondes de températures d'ambiance et extérieure connectées au système testé grâce à des boîtes de résistances variables.

Toutes les armoires sont connectées, via un réseau Ethernet, à un poste central de supervision, équipé du logiciel LabView¹⁹ qui permet :

- Le transfert des données avec chacun des équipements électroniques embarqués dans les modules ;
- Le pilotage du logiciel de simulation TRNSYS, qui simule l'environnement virtuel du test ;

¹⁹ <http://www.ni.com/labview/f/>

- Une visualisation en temps réel du déroulement de la séquence de test et un calcul des flux énergétiques en temps réel.

La Figure 4-4 représente la structure générale de la supervision pendant les tests de SSC.

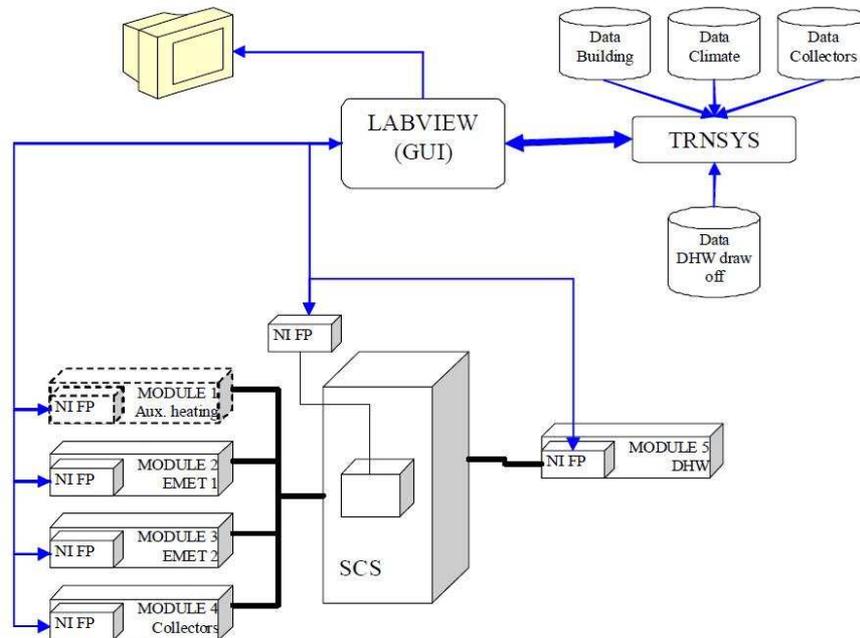


Figure 4-4 Schéma synoptique de la supervision lors des essais (Source : Combisol)

4.1.2. Protocole d'essai et remarques sur les conditions expérimentales

Le SSC à tester est installé dans une cellule de test et connecté au banc d'essai thermique semi-virtuel, comme présenté ci-dessus. Le protocole d'essai complet, comportant différentes phases de conditionnement, une phase centrale de test et une phase de décharge, est le même que celui de la SCSPT (voir paragraphe 1.2.2). Le pas de temps d'acquisition des données est de 1 minute. Les débits et températures mesurées seront ensuite moyennés sur un pas de temps plus long (30 minutes dans cette étude) lors de la phase de traitement des données (voir paragraphe 4.1.3).

Les variables climatiques (paragraphe 1.2.2.3), les profils de puisage d'ECS et d'apports de chaleur internes au bâtiment (paragraphe 3.1.1), ainsi que le modèle de capteurs (paragraphe 2.2.2.2) sont les mêmes que pour la séquence de test « SCSPT classique ». La différence avec cette dernière méthode réside dans l'environnement virtuel du SSC relatif aux modèles de radiateurs et de bâtiment qui sont adaptés à ceux mis en place dans la partie « Boîte Blanche » (voir paragraphe 2.2.2.3).

Le climat, le bâtiment et la surface des capteurs caractérisant l'environnement virtuel de test sont choisis pour chacun des essais. Ils sont présentés au cas par cas pour chaque SSC (voir les paragraphes ci-dessous).

Par rapport au protocole adopté dans l'expérimentation numérique pour extraire les données de la séquence d'entraînement (voir paragraphe 2.3.4), les limites physiques des modules hydrauliques et de leur régulation nous imposent quelques légères modifications notamment au niveau de la modélisation des besoins en eau chaude sanitaire :

- Pour assurer une certaine qualité de régulation du débit \dot{m}_{dhw} imposé par le module 50kW, le puisage minimum en ECS lors de la séquence de test « 12 jours » est limité à $60\text{kg}\cdot\text{hr}^{-1}$. Par rapport au profil de puisage prévu initialement, la consommation journalière passe de 201 à 203L d'ECS à 45°C par jour, ce qui ne devrait pas engendrer de modification conséquente sur les résultats de l'essai ;

- Pour assurer une certaine qualité de régulation de la température d'eau froide T_{tap} imposée par le module 50kW, le profil sinusoïdal initialement envisagé a été remplacé par des paliers journaliers de température (voir Figure 4-5), plus simple à contrôler. Les températures composant les paliers de ce profil sont choisies pour respecter grossièrement une évolution sinusoïdale et ainsi préserver autant que possible une certaine influence de T_{tap} sur la stratification du ballon. Les besoins en ECS passent ainsi de 99,78kWh (profil sinusoïdal) à 99,25kWh (profil par paliers) sur l'ensemble de la séquence 12 jours pour le climat de Zurich (en prenant en compte le débit modifié ci-dessus). Cette adaptation ne devrait pas représenter non plus une modification conséquente sur les résultats de l'essai.

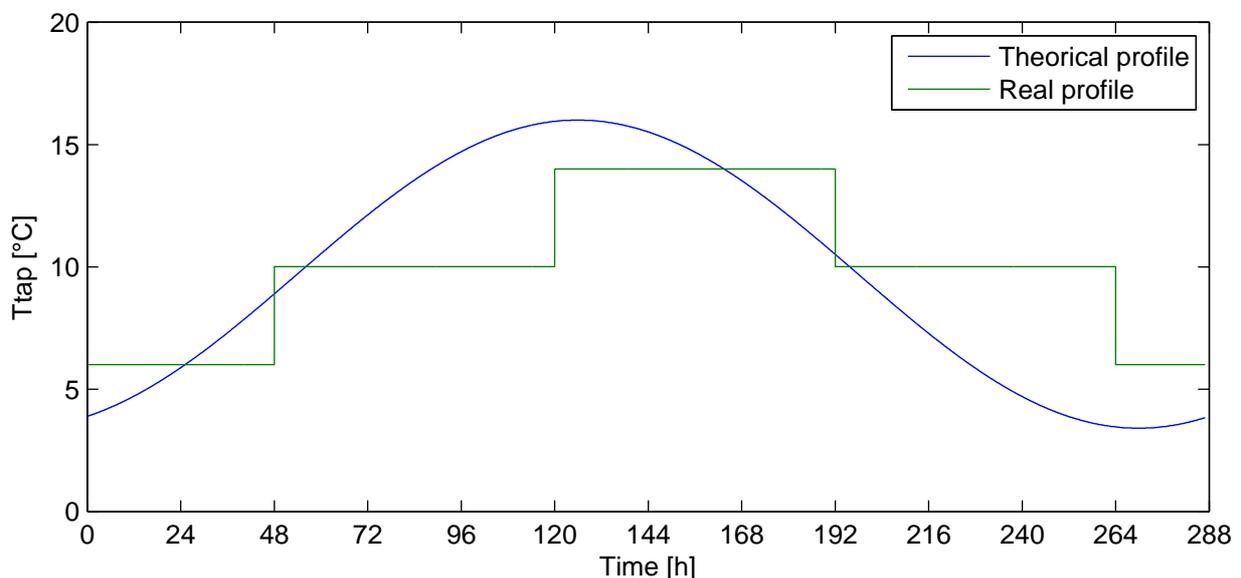


Figure 4-5 Profil théorique et profil réel de la température d'eau froide lors des essais « 12 jours » pour le climat de Zurich

Les paramètres à intégrer au modèle « Boîte Blanche » du modèle du SSC testé sont récupérés pendant la phase de test. Les paramètres propres aux capteurs et aux besoins de chauffage sont directement repris auprès de l'environnement virtuel. Les paramètres de la chaudière d'appoint et du ballon de stockage doivent être évalués et/ou mesurés :

CHAPITRE 4

- A partir de la documentation disponible, il est généralement possible d'évaluer le type de chaudière (*Type* : Standard/Basse Température/Condensation) et sa puissance nominale. Le paramètre *Regul* est évalué selon le type de régulation du chauffage du bâtiment.

- A partir de mesures géométriques grossières, il est possible d'évaluer les paramètres du ballon de stockage et des circuits principaux :

- Le calcul de la capacité de stockage de la chaleur, à partir du volume annoncé par le constructeur V_{store} et des propriétés physiques de l'eau (masse volumique ρ_{water} et capacité calorifique massique c_{water} , prises respectivement à 998kg.m^{-3} et $4,19.10^3\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est exprimé par l'équation (3-10).

$$C_{store} = V_{store} \cdot \rho_{water} \cdot c_{water} \quad (4-1)$$

- En mesurant l'épaisseur de l'isolant autour du ballon $e_{iso,store}$, la hauteur totale du ballon H_{store} et en supposant que celui-ci est de forme cylindrique, on estime ses diamètres utiles au calcul du coefficient global de pertes par l'équation (4-2).

$$\begin{cases} d_{inside,store} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{store}}{\pi \cdot (H_{store} - 2 \cdot e_{iso,store})}} \\ d_{iso,store} = 2 \cdot e_{iso,store} + d_{inside,store} \end{cases} \quad (4-2)$$

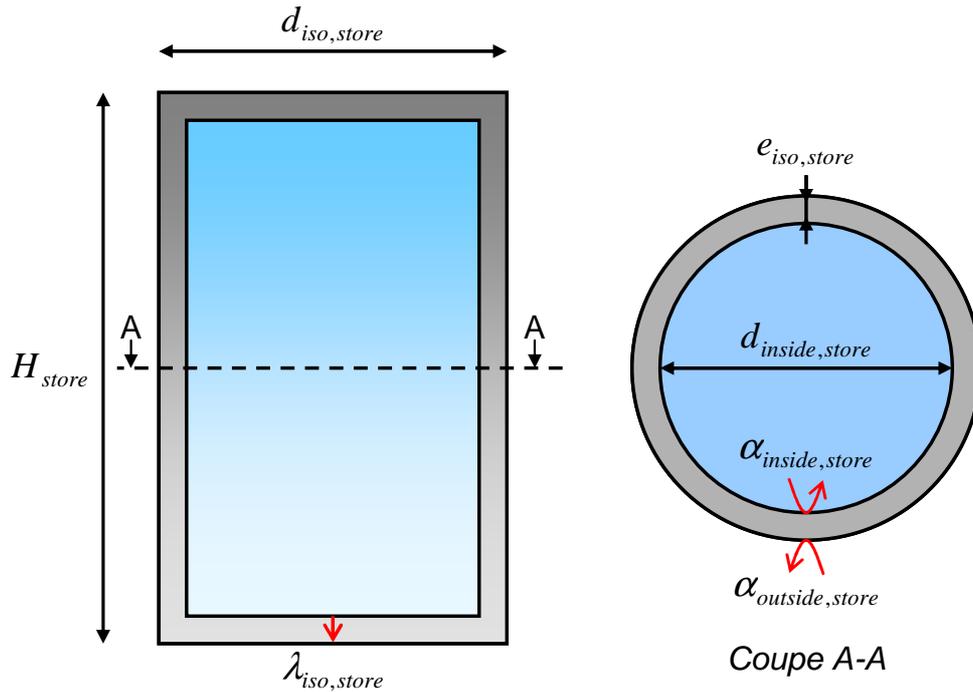


Figure 4-6 Schéma représentant les hypothèses faites sur la forme du ballon de stockage ainsi que ses principaux paramètres géométriques et thermiques nécessaires au calcul de son coefficient global de perte thermique

A l'aide de la conductivité thermique de l'isolant ($\lambda_{iso,store}$) et des coefficients d'échanges superficiels interne ($\alpha_{inside,store}$) et externe ($\alpha_{outside,store}$) (pris par défaut respectivement à 300 et 10W.m⁻².K⁻¹ selon les calculs de la Tâche 32 de l'IEA [Heimrath et Haller, 2007]), la résistance thermique de la partie latérale du ballon ($R_{side,store}$, en m².K.W⁻¹), considérée comme un cylindre vertical, et la résistance thermique des parties inférieure et supérieure du ballon ($R_{caps,store}$, en m².K.W⁻¹), considérées comme des surfaces planes, sont exprimés par l'équation (4-3).

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{side,store} = \frac{d_{inside,store} \cdot \ln\left(\frac{d_{iso,store}}{d_{inside,store}}\right)}{2 \cdot \lambda_{iso,store}} + \frac{d_{inside,store}}{\alpha_{outside,store} \cdot d_{iso,store}} + \frac{1}{\alpha_{inside,store}} \\ R_{caps,store} = \frac{e_{iso,store}}{\lambda_{iso,store}} + \frac{1}{\alpha_{outside,store}} + \frac{1}{\alpha_{inside,store}} \end{array} \right. \quad (4-3)$$

Ainsi la conductance thermique globale du ballon de stockage $(UA)_{store}$, relative à sa surface d'échange interne (sous l'isolant) peut-elle être calculée par l'équation (4-4).

$$\begin{cases} A_{side,store} = (H_{store} - 2.e_{iso,store})\pi.d_{inside,store} \\ A_{caps,store} = \pi.\left(\frac{d_{inside,store}}{2}\right)^2 \\ (UA)_{store} = F_{corr} \left(\frac{A_{side,store}}{R_{side,store}} + 2.\frac{A_{caps,store}}{R_{caps,store}} \right) \end{cases} \quad (4-4)$$

Le coefficient de correction F_{corr} est issu d'une étude menée par [Heimrath, 2004] sur de nombreux systèmes et qui permet de prendre en compte les principaux défauts d'isolation du ballon. Il est donnée en fonction du volume de stockage V_{store} (en m^3) par l'équation (4-5).

$$F_{corr} = \max(1.2 ; -0.1815.\ln(V_{store}) + 1.6875) \quad (4-5)$$

– De la même manière, les coefficients de perte des circuits sont évalués à partir de la mesure de leur longueur l_{pipe} (entre le piquage au niveau du ballon et la prise de température du module correspondant), de leur diamètre intérieure d_{inside} , de l'épaisseur des tuyaux e_{pipe} et celle de l'isolant $e_{insulation}$.

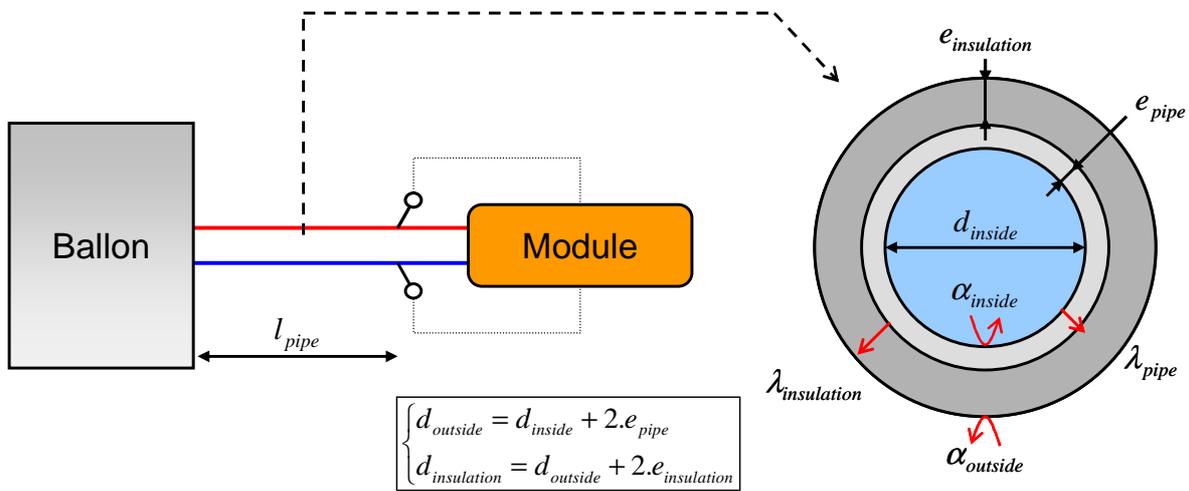


Figure 4-7 Schéma représentant les principaux paramètres géométriques et thermiques nécessaires au calcul du coefficient global de perte thermique d'un circuit

Les propriétés thermiques des tuyaux et de leur isolant (conductivité du tuyau λ_{pipe} , de l'isolant $\lambda_{insulation}$ ainsi que les coefficients d'échange superficiels interne α_{inside} et externe $\alpha_{outside}$ pris par défaut respectivement à 1000 et $10W.m^{-2}.K^{-1}$ selon les calculs de la Tâche 32 de l'IEA [Heimrath et Haller, 2007]) sont combinés aux paramètres géométriques des différents circuits par l'équation (4-6) pour obtenir leur résistance thermique R et finalement leur conductance globale $(UA)_{loop}$.

$$\left\{ \begin{aligned} R &= \frac{d_{inside} \cdot \ln\left(\frac{d_{outside}}{d_{inside}}\right)}{2 \cdot \lambda_{pipe}} + \frac{d_{inside} \cdot \ln\left(\frac{d_{insulation}}{d_{outside}}\right)}{2 \cdot \lambda_{insulation}} + \frac{d_{inside}}{\alpha_{outside} \cdot d_{insulation}} + \frac{1}{\alpha_{inside}} \quad (4-6) \\ (UA)_{loop} &= \frac{1}{R} \cdot \pi \cdot d_{inside} \cdot l_{pipe} \end{aligned} \right.$$

L'obtention de ces paramètres ne peut pas être réalisée de manière très rigoureuse mais une recherche plus poussée dénaturerait la philosophie de ce genre de test, qui se veut la moins intrusive possible. Les paramètres ainsi évalués doivent être pertinents pour l'apprentissage d'un modèle global correct, qui sera ensuite utilisé. Il ne faut donc pas espérer restituer une évolution précise de la température moyenne du ballon de stockage mais plutôt espérer fournir une certaine information que le modèle aura appris à interpréter à sa manière (voir le traitement des résultats expérimentaux dans les paragraphes 4.2.3 et 4.3.3).

Il faut également remarquer que malgré une bonne qualité du contrôle/commande des modules hydrauliques pour répondre à leur consigne, leur régulation reste imparfaite. Il y a donc des écarts entre les températures calculées sous TRNSYS (températures en sortie des capteurs, en sortie des émetteurs et température d'eau froide du réseau) et celles réellement fournies au système en cours de test (voir la Figure 4-8 représentant un extrait des données issues de l'essai présenté dans le paragraphe 4.2.2.1).

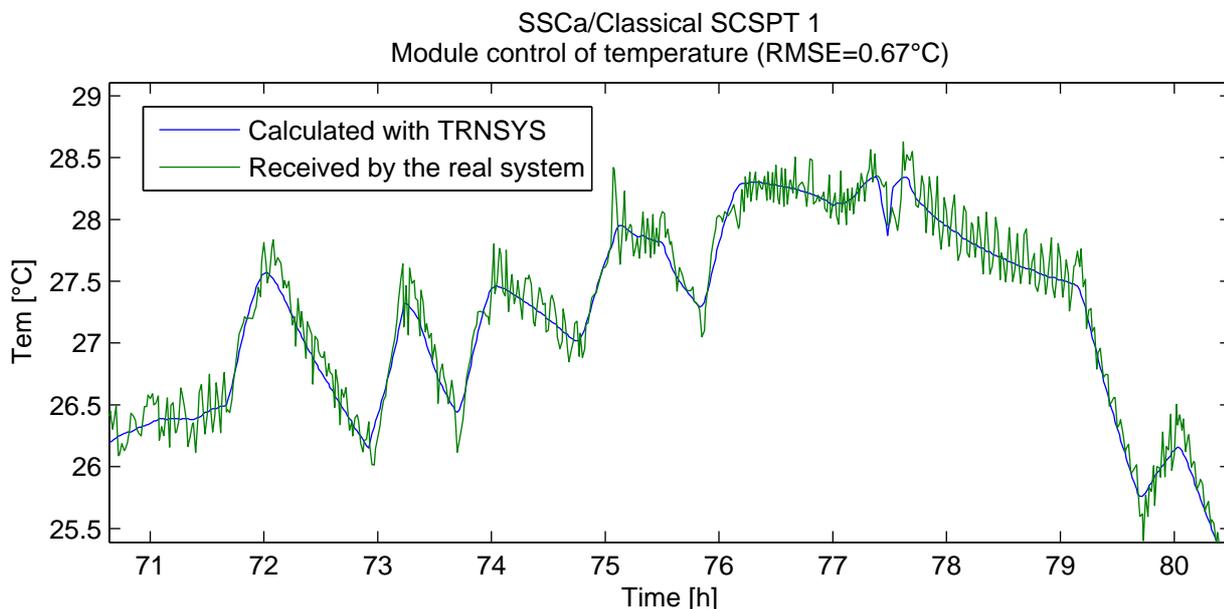


Figure 4-8 Exemple d'écart existant entre la température de retour des émetteurs calculée sous TRNSYS (consigne du module) et la température réellement délivrée au système

Ces écarts, généralement faibles, peuvent être amplifiés selon les configurations et le fonctionnement du SSC (lors de sollicitations brusques des émetteurs par exemple). Nous constaterons ces écarts et leur impact sur le calcul des puissances mises en jeu au sein du système, mais aucune adaptation particulière n'a été réalisée jusqu'à présent dans le traitement des informations de la séquence de test pour pallier ce problème. Les puissances « vues du côté TRNSYS » (c'est-à-dire en

considérant les températures de consigne calculées par le logiciel et non pas réelles en sortie des modules) sont choisies pour le traitement final des données et l'apprentissage des modèles « Boîtes Grises » afin de respecter au maximum l'évolution de l'état du système (voir le vecteur d'état Chapitre 2) pendant l'essai. Ceci est important puisque, par exemple, T_{room} et T_{coll} , calculées sous TRNSYS et envoyées directement comme information à la régulation du système testé, peuvent jouer un rôle déterminant pour la gestion des flux de chaleur. Il semble donc essentiel, pour que le modèle apprenne correctement le comportement du SSC, que ces températures soient estimées de la même manière pendant la séquence de test et lors de la phase d'entraînement.

Pour conclure les remarques générales sur les conditions expérimentales, il faut également préciser que le nombre important de valeurs à contrôler favorise grandement les erreurs de paramétrage de l'expérimentation et qu'il est surtout très difficile de réaliser un test de 12 jours consécutifs sans problèmes (panne du système, coupures d'électricité intempestive, problèmes de connexions au réseau informatique,...). Comme le banc d'essai semi-virtuel d'INES est mutualisé entre divers projets de recherche, sa disponibilité ne nous a pas toujours permis de refaire certaines expériences comme nous l'aurions souhaité.

4.1.3. Traitement des données

Le paramétrage de la procédure d'entraînement et de sélection d'un modèle « Boîte Grise » est exactement le même que celui utilisé dans le Chapitre 3 (voir paragraphe 3.1.2). L'entraînement est réalisé à partir des données issues d'un des différents tests du système étudié. Il est même possible d'identifier plusieurs modèles « Boîte Grise » à partir de données venant de séquences de test différentes et comparer les résultats obtenus pour le même SSC.

Le traitement supplémentaire à réaliser par rapport à l'expérimentation numérique concerne la température moyenne initiale du ballon. L'initialisation du vecteur d'état du système pour une séquence d'entraînement ne pose pas de problème pour les températures moyennes des capteurs, des émetteurs et de la masse thermique du bâtiment, qui peuvent être relevées à partir des données de l'environnement virtuel enregistrées pendant l'essai. Par contre, la température moyenne du ballon en début de test est complètement inconnue et nécessite quelques hypothèses.

Il a bien été envisagé de rajouter une étape de conditionnement au protocole expérimental pour s'assurer que la totalité du contenu du ballon soit à une température uniforme, par exemple 20°C, en utilisant les modules hydrauliques, et ensuite d'enregistrer les bilans énergétiques à partir de ce point. Cependant, des tentatives d'application de ce principe ont rapidement montré ses limites et ses difficultés :

- Tout d'abord, selon la capacité du ballon de stockage, amener ce dernier à une température uniforme peut prendre un temps considérable, surtout si le SSC a déjà été en fonctionnement juste avant ce conditionnement ;
- Ensuite, selon le fonctionnement du système, il n'est pas forcément aisé de piloter tous les circuits pour modifier la température du stockage comme on le souhaite. En effet, les modules hydrauliques 25kW ne peuvent imposer un débit aux circuits qu'ils contrôlent (ils ne font qu'imposer une température du fluide retournant

vers le système). Il faut donc pouvoir forcer la circulation des différents fluides à partir des commandes du système testé, ce qui n'est pas toujours réalisable compte tenu de la conception de ce dernier. De plus, le système d'énergie d'appoint est uniquement contrôlé par le SSC. Même s'il était possible de couper la fourniture d'énergie et de forcer la circulation de son circuit, la température du fluide entrant dans le ballon de stockage ne pourrait pas être contrôlée, ce qui ne facilite pas le conditionnement envisagé.

- Finalement, en supposant que l'on peut forcer la mise en marche de chaque circuit, il est impossible de contrôler la température réelle à l'intérieur du stockage. Une évaluation de la température dans le ballon ne peut se faire qu'en mesurant la température des fluides sortant au niveau de chaque circuit (piquages directs et/ou échangeurs). Toutefois, même en constatant la stabilité de ces températures, il n'y aurait aucune certitude quant à l'uniformité de la température moyenne du ballon. Selon la conception du système et de son stockage, les circuits pouvant être pilotés ne concernent pas forcément toutes les zones à l'intérieur du ballon.

Pour pallier ce problème d'évaluation de $T_{store,ini}$, nous avons fait l'hypothèse, assez probable, que le niveau de température dans le ballon de stockage est le même en début et en fin de la séquence de test « 12 jours ». En effet, la séquence complète comprend comme deuxième phase de conditionnement la simulation de la dernière journée de la séquence « 12 jours » avant l'application de la phase centrale de test (voir paragraphe 1.2.2.3). Ainsi, la première journée étant préalablement précédée de la dernière journée de la séquence de test, il est fort probable que le niveau de température dans le stockage soit équivalent en début et en fin de séquence d'entraînement.

Un algorithme de prétraitement des données a été mis en place pour pouvoir déterminer quelle doit être la température initiale $T_{store,ini}$ du ballon pour que le modèle de stockage de la partie « Boîte Blanche » permette d'avoir une température moyenne sur les 6 premières heures de la séquence de test ($\bar{T}_{store,6h,i}$) égale à la température moyenne sur les 6 dernières heures de la séquence de test ($\bar{T}_{store,6h,f}$). Cet algorithme est basé sur la méthode de la sécante (déjà employée dans le paragraphe 2.2.2.3), qui est une méthode itérative permettant de rechercher le zéro d'une fonction, sans passer par sa fonction dérivée. La fonction utilisée ici est décrite par l'équation (4-7).

$$\left\{ \begin{array}{l} x = T_{store,ini} \\ x_0 = 20^{\circ}C, x_1 = 30^{\circ}C \\ T_{store} = BoiteBlanche(x) \\ \bar{T}_{store,6h,i} = \frac{1}{6/\Delta t} \sum_{i=1}^{6/\Delta t} T_{store}(i) \\ \bar{T}_{store,6h,f} = \frac{1}{6/\Delta t} \sum_{i=282/\Delta t}^{288/\Delta t} T_{store}(i) \\ f(x) = \bar{T}_{store,6h,f} - \bar{T}_{store,6h,i} \end{array} \right. \quad (4-7)$$

CHAPITRE 4

La quatrième équation dans (4-7) signifie que la partie « Boîte Blanche » est appliquée à l'ensemble des données issues de l'essai, avec x comme température initiale du ballon, pour estimer l'évolution de T_{store} durant la séquence de test. Le paramètre Δt , utilisé pour calculer les moyennes de T_{store} en début et fin de séquence, représente le pas de temps des données expérimentales (exprimé en heure).

Cet algorithme est intégré à l'étape de traitement des données du processus d'entraînement, qui est ensuite appliqué comme décrit dans le Chapitre 2.

Lorsqu'un modèle « Boîte Grise » est sélectionné, il est soumis à plusieurs simulations annuelles pour pouvoir caractériser les performances du SSC testé. Les 27 environnements présentés dans le Chapitre 3 (paragraphe 3.1.1), sont utilisés à cet effet. Les formules appliquées pour le calcul des performances ($f_{sav,th}$ et FSC) sont détaillées dans le paragraphe 3.1.3.3.

Compte tenu des observations réalisées dans le CHAPITRE 3 quant à l'importance du jeu initial de poids synaptiques pour l'apprentissage d'un modèle neuronal et l'impossibilité qui en découle d'identifier un modèle « Boîte Grise » unique de SSC, la procédure d'entraînement et de sélection d'un réseau de neurones est lancée plusieurs fois de suite avec les mêmes données expérimentales.

4.2. Tests du SSCa

4.2.1. Description du système

4.2.1.1. Conception, fonctionnement du SSCa et remarques sur son installation pour les tests

Le premier système testé, le SSCa, est un prototype d'un fabricant. Selon la classification Combisol (voir paragraphe 1.1.1.3), il est du type B1 (voir Figure 4-9).

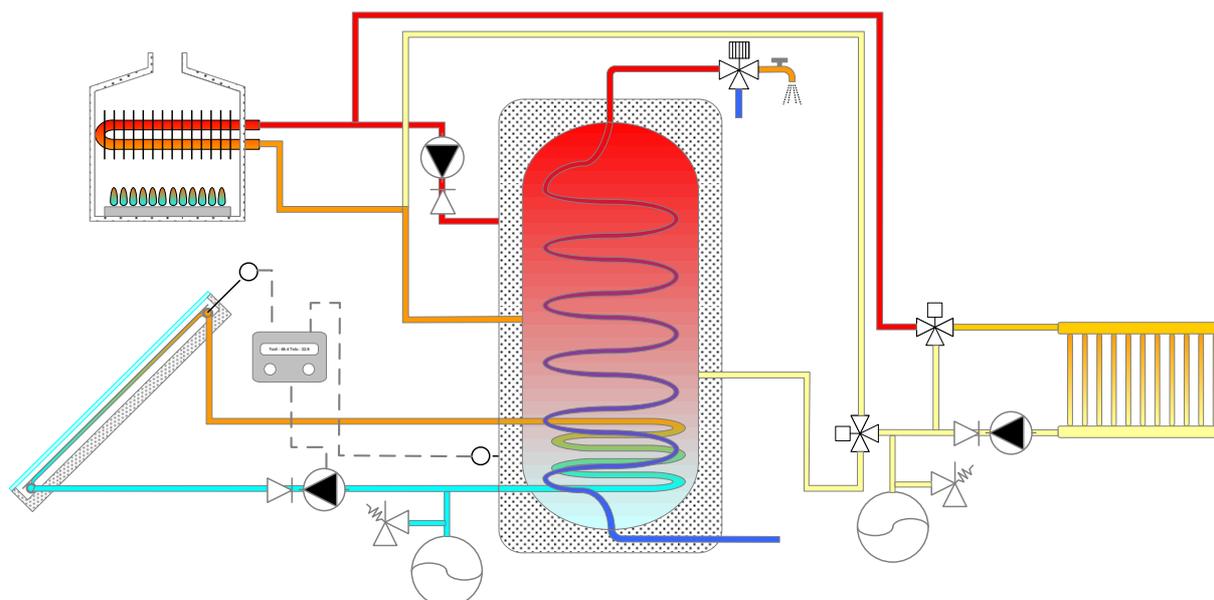


Figure 4-9 Schéma hydraulique du SSCa, du type B1 selon la classification du projet COMBISOL

Les particularités de ce système d'un point de vue de gestion des flux de chaleur sont :

- Transfert de la chaleur solaire via un échangeur interne au ballon de stockage;
- Transfert de la chaleur pour l'ECS via un échangeur interne au ballon de stockage;
- Augmentation de la température de retour de chauffage par un piquage direct sur le ballon de stockage.

L'installation du SSCa sur le banc d'essai d'INES a été réalisée avec la documentation disponible et le support à distance du fabricant, mais aucune visite de contrôle n'a été effectuée concrètement par ce dernier.

Le matériel livré par le fabricant pour tester le SSCa était incomplet. Il comprenait :

- un ballon de stockage de 1000 litres ;
- une panoplie hydraulique séparée pour la gestion du circuit de chauffage (Figure 4-10).



Figure 4-10 Photo de la panoplie hydraulique externe reçue pour la gestion du circuit de chauffage du SSCa

Les autres composants nécessaires à l'installation complète du SSCa ont été récupérés, en accord avec le fabricant, sur d'autres prototypes de ce dernier déjà testés auparavant et disponibles au LETh :

- Les sondes de température ;
- Le circulateur de la boucle solaire ;
- La chaudière gaz ;
- Le circuit hydraulique de la boucle solaire ;
- Le bloc de sécurité hydraulique d'eau sanitaire et le mitigeur d'ECS.

Le SSCa est donc plus proche d'un système assemblé à façon que d'une installation préfabriquée en usine (voir l'installation complète sur la Figure 4-11).



Figure 4-11 Photo du SSCa installé sur le banc d'essai thermique semi-virtuel

La configuration de base de la régulation du système est légèrement modifiée pour chaque test. Les valeurs de certains paramètres de la loi de chauffe (courbe fixant la température de consigne en entrée des radiateurs en fonction de la température extérieure) sont ajustées pour que la gestion des besoins de chauffage soit adaptée au bâtiment de l'environnement virtuel correspondant à l'essai en cours.

4.2.1.2. Paramétrage du modèle « Boîte Grise » pour le SSCa

Les paramètres caractérisant l'environnement du SSCa (variables météorologiques, besoins de chauffage, émetteurs de chaleur et besoins en ECS) sont les mêmes que ceux utilisés pour l'expérimentation numérique (voir paragraphe 3.1.1), aussi bien pour créer l'environnement virtuel lors du test que pour réaliser les différentes simulations de caractérisation des performances du système.

Sans préconisation particulière du fabricant, le paramétrage des capteurs retenu est un paramétrage standard, utilisé pour représenter des capteurs plans sélectifs dans le modèle de SSC de référence de la Tâche 32 de l'IEA [Heimrath et Haller, 2007].

Pour les éléments réellement présents pendant la phase de test, des informations relevées dans les documentations disponibles et quelques mesures rapides ont été nécessaires pour fixer certains paramètres :

- Le système d'énergie d'appoint est une chaudière à condensation ($Type = 102$), équipée d'un dispositif de circulation d'air dans le circuit de combustion ($Ventil = 1$). Il est branché directement sur le circuit de chauffage (voir paragraphe 4.2.1.1) et la régulation du chauffage est principalement basée sur la température extérieure ($Regul = 2$) ;

CHAPITRE 4

- Le ballon a un volume de 1000L. Sa hauteur est d'environ 2,1m et il est isolé par une couche de mousse de polyuréthane ($\lambda_{iso} = 0,043 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) de 100mm d'épaisseur ;

- La mesure des températures des fluides à l'aller et au retour de chaque circuit connecté à un module se fait au plus près possible du système. Ainsi, les pertes des canalisations sont négligées pour le circuit solaire et le circuit d'ECS. Par contre, la panoplie complète gérant à la fois le circuit du système d'appoint et le circuit de chauffage intègre de nombreux instruments et des longueurs de canalisation non négligeables. On estime par conséquent que chacun de ces deux circuits est constitué de tuyaux en cuivre ($\lambda_w = 372 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), d'une longueur de 5m, isolés par une épaisseur de 20mm d'isolant flexible en mousse élastomère ($\lambda_{iso} = 0.042 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

En prenant en compte ces observations et à l'aide des formules du paragraphe 4.1.2, le paramétrage de la partie « Boîte Blanche » du modèle global du SSCa est donné dans le Tableau 3-9 ci-après.

Capteur	Stockage	Appoint
$\beta = 45^\circ$	$C_{store} = 4,18.10^6 \text{ J.K}^{-1}$	$Type = 102$
$\gamma = 0^\circ$	$(UA)_{store} = 5 \text{ W.K}^{-1}$	$Regul = 3$
$alb = 0,2$	$T_{amb,store} = 18^\circ\text{C}$	$Ventil = 1$
$F'(\tau\alpha)_{en} = 0,8$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24.10^3 \text{ W}$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24.10^3 \text{ W}$
$K_{\theta l} = 0,9$	$T_{aux,hot,nom} = 80^\circ\text{C}$	$T_{amb,aux} = 18^\circ\text{C}$
$b_0 = 0,2$	$T_{aux,cold,nom} = 60^\circ\text{C}$	$T_{em,in,d}^* = 40^\circ\text{C}$
$c_1 = 3,50 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$T_{set,dhw} = 45^\circ\text{C}$	$T_{a,d}^* = -10^\circ\text{C}$
$c_2 = 0,015 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-2}$	$(UA)_{aux,loop,hot} = 1,62 \text{ W.K}^{-1}$	$T_{set,room} = 20^\circ\text{C}$
$c_3 = 0 \text{ W.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{aux,loop,cold} = 1,62 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_4 = 0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_5 = 7000 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_6 = 0 \text{ s.m}^{-1}$	$(UA)_{em,loop,hot} = 1,62 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{em,loop,cold} = 1,62 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	

Tableau 4-1 Paramètres du SSCa pour son modèle "Boîte Grise" (les valeurs des paramètres marqués * changent en fonction de l'environnement et correspondent ici à l'environnement d'entraînement)

4.2.2. Essais réalisés et données disponibles

4.2.2.1. Essais réalisés selon la méthode « SCSPT classique »

Le SSCa a d'abord été testé selon la méthode SCSPT « classique » (voir paragraphe 1.2.2). Deux essais consécutifs ont été effectués pour étudier la répétitivité de la démarche. L'environnement virtuel pour ces tests est celui présenté dans le Tableau 3-5.

Nom de l'essai	Bâtiment	Climat	Surface des capteurs
Essai0	SFH60	Zurich	16,1m ²

Tableau 4-2 Environnement virtuel des essais « SCSPT classiques » du SSCa

Il faut rappeler que dans le cadre de la méthode « SCSPT classique », l'environnement virtuel est constitué de modèles utilisés lors de la Tâche32 de l'IEA (et notamment le modèle de bâtiment établi par un « Type 56 » sous TRNSYS, voir paragraphe 2.2.2.3).

La Figure 4-12 ci-dessous représente la température de l'air intérieur T_{room} maintenue par le SSCa lors de deux essais (type Essai0) lancés de manière consécutive.

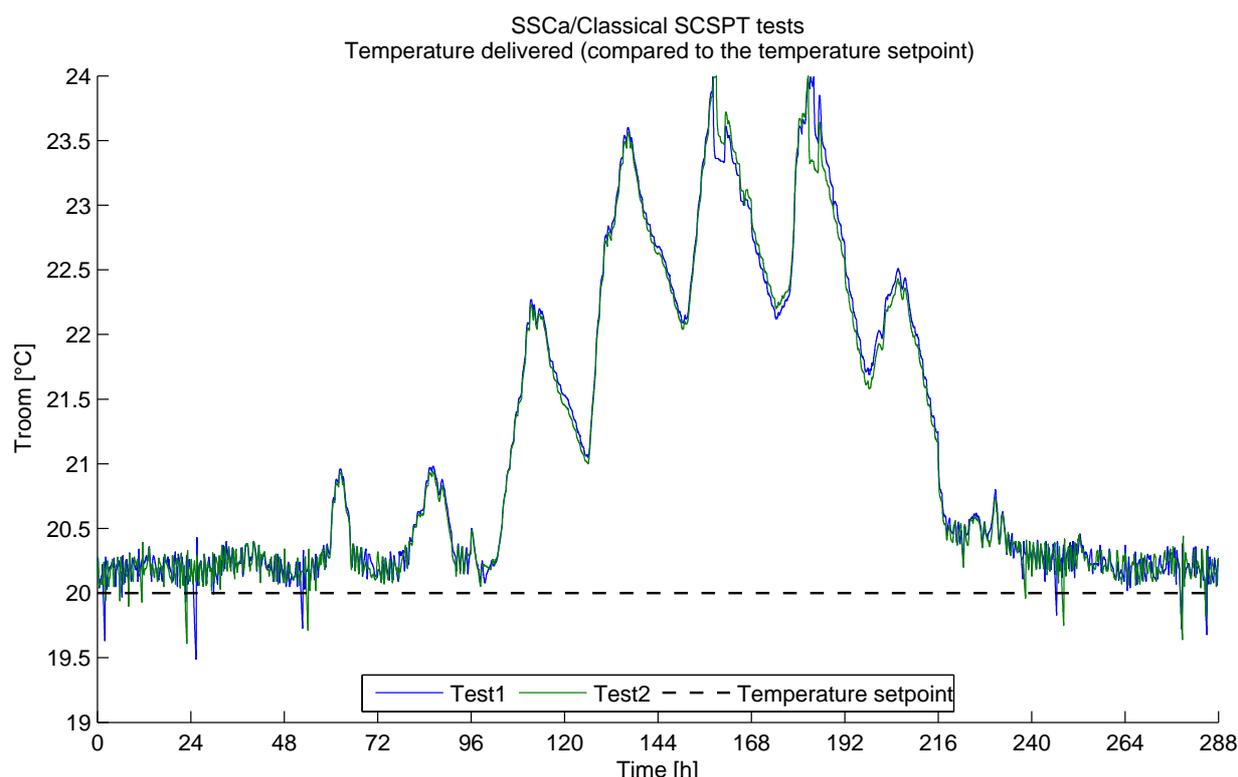


Figure 4-12 Température de l'air intérieur délivrée par le SSCa lors de deux tests consécutifs de type « Essai0 », comparées à leur température de consigne respective

La figure ci-dessus permet de constater :

- d'une part que la répétitivité de la méthode semble bonne puisque les températures sont sensiblement les mêmes quel que soit l'essai;

CHAPITRE 4

- d'autre part que le SSCa respecte correctement la consigne qui lui a été imposées pendant l'Essai0 pour la température d'air intérieur. On peut cependant noter que T_{room} oscille autour de 20,3°C en période de chauffe.

Pour conclure les observations de la gestion du système par rapport à ses consignes, nous avons constaté également que le SSCa, dans cette configuration, délivre une ECS à température T_{DHW} au dessus de la consigne de 45°C, souvent aux alentours de 49°C. L'écart observé résulte probablement d'un réglage légèrement inadapté de la vanne thermostatique en sortie du système.

Les défauts de régulation de chacun des modules hydrauliques n'engendrent pas de différences considérables entre les énergies calculées sous TRNSYS et les énergies réellement mesurées aux bornes du SSCa pendant les essais « SCSPT classiques » (de type Essai0). Le Tableau 4-3 montre les énergies relevées pour l'environnement virtuel et pour le système réel lors des 2 lancements de l'Essai0 du SSCa.

N°essai (Essai0)	Q_{aux}		Q_{em}		Q_{coll}		Q_{dhw}	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Energie calculée [kWh]	-	-	301	301	137	137	97	98
Energie mesurée [kWh]	329	324	293	295	137	135	96	96
Erreur [%]	-	-	2,40	2,16	0,08	0,82	1,57	1,32

Tableau 4-3 Energies calculées au niveau de l'environnement virtuel et mesurées aux bornes du système lors des 2 applications de l'Essai0 du SSCa

Ces données serviront de repères pour étudier la cohérence de la caractérisation du SSCa selon la nouvelle approche de caractérisation que nous avons mis au point.

4.2.2.2. Essais réalisés selon la méthode « SCSPT modifiée »

A la suite des essais « SCSPT classiques », nous avons pu soumettre le SSCa à des essais SCSPT adaptés, compte tenu de l'approche présentée dans ce mémoire (voir CHAPITRE 2). Nous avons réalisé deux essais, ayant chacun un environnement virtuel différent. Ces environnements sont présentés dans le Tableau 4-4.

Nom de l'essai	Bâtiment	Climat	Surface des capteurs
Essai1	SFH60	Zurich	16,1m ²
Essai2	SFH100	Stockholm	10m ²

Tableau 4-4 Environnements virtuels des essais SCSPT « modifiés » du SSCa

Il faut rappeler que dans le cadre de la méthode « SCSPT modifiée », l'environnement virtuel est constitué de modèles plus simplifiés que ceux utilisés lors de la Tâche 32 de l'IEA, issus pour la plupart de normes internationales et/ou européennes (et notamment le modèle de bâtiment établi selon la norme internationale ISO13790 :2008, voir paragraphe 2.2.2.3).

Lors de ces essais, l'étude complète du modèle des émetteurs de chaleur à intégrer dans la partie « Boîte Blanche » du modèle neuronal de SSC, telle que présentée

dans le paragraphe 2.2.2.3, n'était pas achevée. Ainsi, le calcul du coefficient d'échange K (équation (2-34)) et l'adaptation de la formule de la puissance nominale (équation (3-4)) étaient les mêmes que pour le modèle détaillé des émetteurs utilisé dans la Tâche 32 de l'IEA (équations (2-35) et (3-3)). Ils n'étaient donc pas encore adaptés à la simplification de l'expression de l'échange thermique entre les émetteurs et l'air intérieur – puissance fonction d'une différence simple entre T_{em} et T_{room} et non d'une différence logarithmique. Par conséquent, les émetteurs virtuels lors de ces tests étaient légèrement sous-dimensionnés par rapport à leur juste fonctionnement (par exemple le coefficient d'échange K est sous évalué de pratiquement 20% pour les conditions climatiques de Zurich et le bâtiment SFH60). La température de retour des émetteurs calculée est donc plus importante qu'en fonctionnement normal et a des conséquences sur les performances du système testé²⁰. L'Essai1 et l'Essai2 correspondent donc à une configuration particulière, différente de celle de l'Essai0, pour laquelle les performances du SSCa risquent d'être moindres. La caractérisation du SSCa à partir de ces essais prendra donc en compte le sous-dimensionnement des émetteurs de chaleur.

L'Essai1 adopte le même environnement virtuel que l'Essai0 (voir Tableau 3-5). Il permettra ainsi de constater la différence de consommation d'énergie d'appoint effective, liée au sous-dimensionnement des émetteurs de chaleur.

L'Essai2 adopte un environnement virtuel totalement différent. Il a pour vocation principale de tester la généralisation des modèles « Boîte Grise » identifiés en les confrontant à des variables différentes. Le comportement réel du SSCa et celui estimé par ses modèles « Boîte Grise » pourront ainsi être comparés en détail.

Lors du premier lancement de l'Essai2, différents incidents sont intervenus :

- Une panne du circulateur de la boucle de chauffage est survenue rapidement (carte électronique du composant devenue hors-service). Après réparation, cet essai a pu être relancé et les résultats définitifs obtenus.
- Cependant, une erreur de paramétrage de la régulation du module émulant les capteurs lors de cette relance (réinitialisation d'un « offset » imprévue) a entraîné des différences plus importantes que d'habitude entre la consigne de température en sortie des capteurs virtuels et la température du fluide réellement fournie par le module émulateur. Les différences entre la puissance fournie par les capteurs calculée par l'environnement virtuel et celle réellement fournie sont donc plus importantes également. Cette erreur n'a été détectée et corrigée qu'au deux tiers de l'essai (comme le montre l'évolution de la différence entre température calculée et température mesurée sur la Figure 4-13, changeant brusquement après l'heure 168).

²⁰ Par exemple, un calcul réalisé avec le modèle détaillé SSC1 (voir paragraphe 3.2.1) à l'aide de TRNSYS pour les deux configurations de dimensionnement des émetteurs pour le climat de Zurich et le bâtiment SFH60 estime que la surconsommation d'énergie d'appoint est d'environ 5% lorsque les paramètres ne sont pas adaptés.

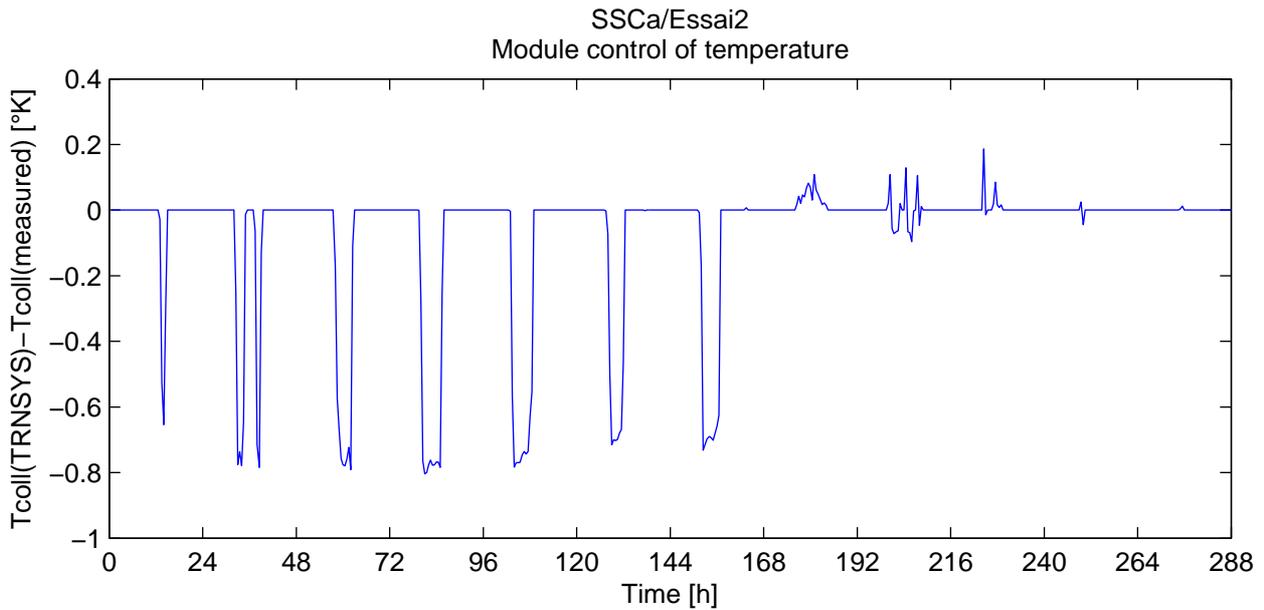


Figure 4-13 Différence entre la température en sortie des capteurs calculée dans l'environnement virtuel et celle réellement mesurée en sortie du module hydraulique pendant l'Essai2 du SSCa

Le banc d'essai n'était pas disponible suffisamment longtemps pour relancer ce test une nouvelle fois, de manière correcte. Cette erreur sera donc à considérer lors de l'interprétation des résultats obtenus.

La Figure 4-14 permet d'observer la qualité de régulation du SSCa sur T_{room} pour les 3 types d'essai différents (« Essai0 », « Essai1 » et « Essai2 »).

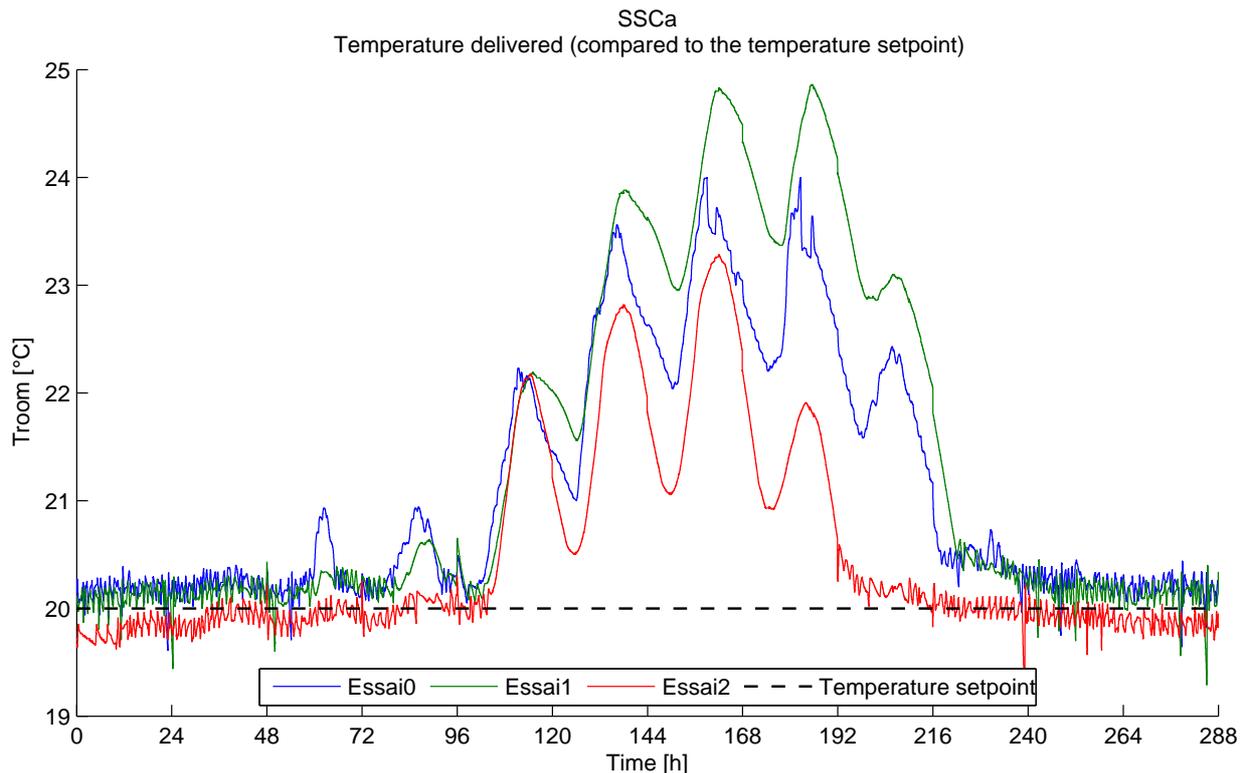


Figure 4-14 Température de l'air délivrée par le SSCa lors des tests « Essai0 », « Essai1 » et « Essai2 », comparées à leur température de consigne respective

Entre l'Essai0 et l'Essai1, la gestion de la température de l'air intérieur par le SSCa est très semblable. En période de chauffe, T_{room} est aux alentours de 20,3°C dans les deux cas. Les principales différences s'observent lors de journées plus chaudes, avec de forts apports solaires passifs, pour lesquelles la protection anti-surchauffe du modèle de bâtiment de l'Essai0 joue un rôle important.

Malgré les adaptations de la régulation de chauffage effectuées pour l'Essai2, le SSCa maintient T_{room} légèrement en deçà de la température de consigne (autour de 19,8°C). Il y a donc une gestion légèrement différente des besoins de chauffage entre cet essai et les deux premiers. Néanmoins cette différence est suffisamment faible pour permettre la comparaison des performances du SSCa entre ces différents environnements.

La gestion de T_{dhw} est globalement la même, avec des températures pouvant aller jusqu'à 49°C dans les trois cas.

La Tableau 4-5 ci-dessous montre les énergies relevées pour l'environnement virtuel et pour le système réel lors de l'Essai1 et de l'Essai2 du SSCa.

	Essai1				Essai2			
	Q_{aux}	Q_{em}	Q_{coll}	Q_{dhw}	Q_{aux}	Q_{em}	Q_{coll}	Q_{dhw}
Energie calculée [kWh]	-	305	131	96	-	745	93	97
Energie mesurée [kWh]	345	299	130	95	829	743	106	96
Erreur [%]	-	2,11	0,94	1,12	-	0,30	-13,77	1,16

Tableau 4-5 Energies calculées au niveau de l'environnement virtuel et mesurées aux bornes du système lors de l'Essai1 et de l'Essai2 du SSCa

On constate tout d'abord que l'énergie fournie par le système aux émetteurs de chaleur lors de l'Essai1 est très proche de celle de l'Essai0 (à 4kWh près pour l'environnement virtuel, voir Tableau 4-3). Le modèle de bâtiment issu de la norme internationale, avec le paramétrage présenté en ANNEXE A, permet de traduire pratiquement la même quantité de besoins de chauffage lors de la séquence de test « 12 jours ». Ceci laisse à penser que l'usage actuel du « type 56 » de TRNSYS, modèle de bâtiment dans la méthode SCSPT peut donc être effectivement remplacé assez facilement par un modèle reconnu par les instances de normalisation.

La différence d'énergie d'appoint consommée par le SSCa entre l'Essai0 et l'Essai1 est plus grande. Cette consommation est plus importante (entre 16 et 20kWh selon l'Essai0 considéré, soit aux alentours de 6% de consommation supplémentaire) dans le cas du test « SCSPT modifié ». Il y a plusieurs raisons à cela :

- D'une part, les besoins de chauffage, bien que proches dans les deux cas, sont un peu plus importants dans l'Essai1 (4kWh de différence). De plus, l'écart entre énergie calculée et énergie mesurée est un peu plus réduit dans ce cas (probablement la conséquence d'un comportement des émetteurs de chaleur plus favorable à la régulation des modules hydrauliques), ce qui augmente encore légèrement l'énergie réellement fournie par le SSCa ;
- D'autre part, l'énergie récupérée par la partie solaire du SSCa est moindre lors de l'Essai1 (de l'ordre de 6kWh inférieure). Cette différence s'explique par le sous-dimensionnement du modèle d'émetteur de chaleur dans l'environnement virtuel (voir les remarques sur les conditions de ces essais en début de paragraphe). En effet, dans ce cas, la température de fluide en sortie des émetteurs est plus élevée que lorsque les émetteurs sont dimensionnés correctement. De ce fait, la décharge thermique du ballon par retour du fluide du circuit émetteur se fait moins facilement. Par conséquent, le ballon étant probablement à plus haut niveau de température dans l'Essai1, le stockage d'énergie solaire y est également plus limité également. La chaudière d'appoint compense la différence de fourniture d'énergie solaire pour répondre aux besoins de chaleur, ce qui explique l'écart assez important sur Q_{aux} entre l'Essai0 et l'Essai1.

L'erreur de paramétrage de la régulation du module émulateur des capteurs lors de la relance de l'Essai2, évoquée plus haut dans ce paragraphe, a effectivement entraîné un écart plus important entre l'énergie Q_{coll} calculée par l'environnement virtuel et celle réellement reçue par le SSCa. Celui-ci a reçu plus d'énergie venant du circuit solaire que ce qu'il aurait dû. Cependant, cette erreur est survenue pour un test dont l'environnement ne présentait pas une ressource en énergie solaire importante par rapport à ses besoins de chaleur, ce qui a limité l'impact de cet excès

d'énergie au niveau du système. Les performances du SSCa ne sont donc sûrement que légèrement sur-estimées pour l'environnement de cet essai.

4.2.3. Traitement des données pour l'identification de modèles « Boîte Grise » du SSCa

Nous avons à disposition deux séquences d'entraînement (Essai1 et Essai2) pour caractériser le SSCa. Compte tenu de l'environnement virtuel plus « extrême » (besoins de chauffage élevés, ressource solaire faible et surface de capteurs solaires réduites) lors de l'Essai2, les données issues de cet essai n'étaient pas envisagées pour l'identification de modèles « Boîte Grise » du SSCa, mais plutôt destinées à la validation de modèles identifiés à partir des données de l'Essai1. Toutefois, il sera également possible de tenter la caractérisation du SSCa à partir la séquence Essai2 afin de comparer les courbes obtenues dans deux conditions de test différentes du même SSC.

L'estimation des états du SSCa lors de l'Essai1 est présentée sur la Figure 4-15.

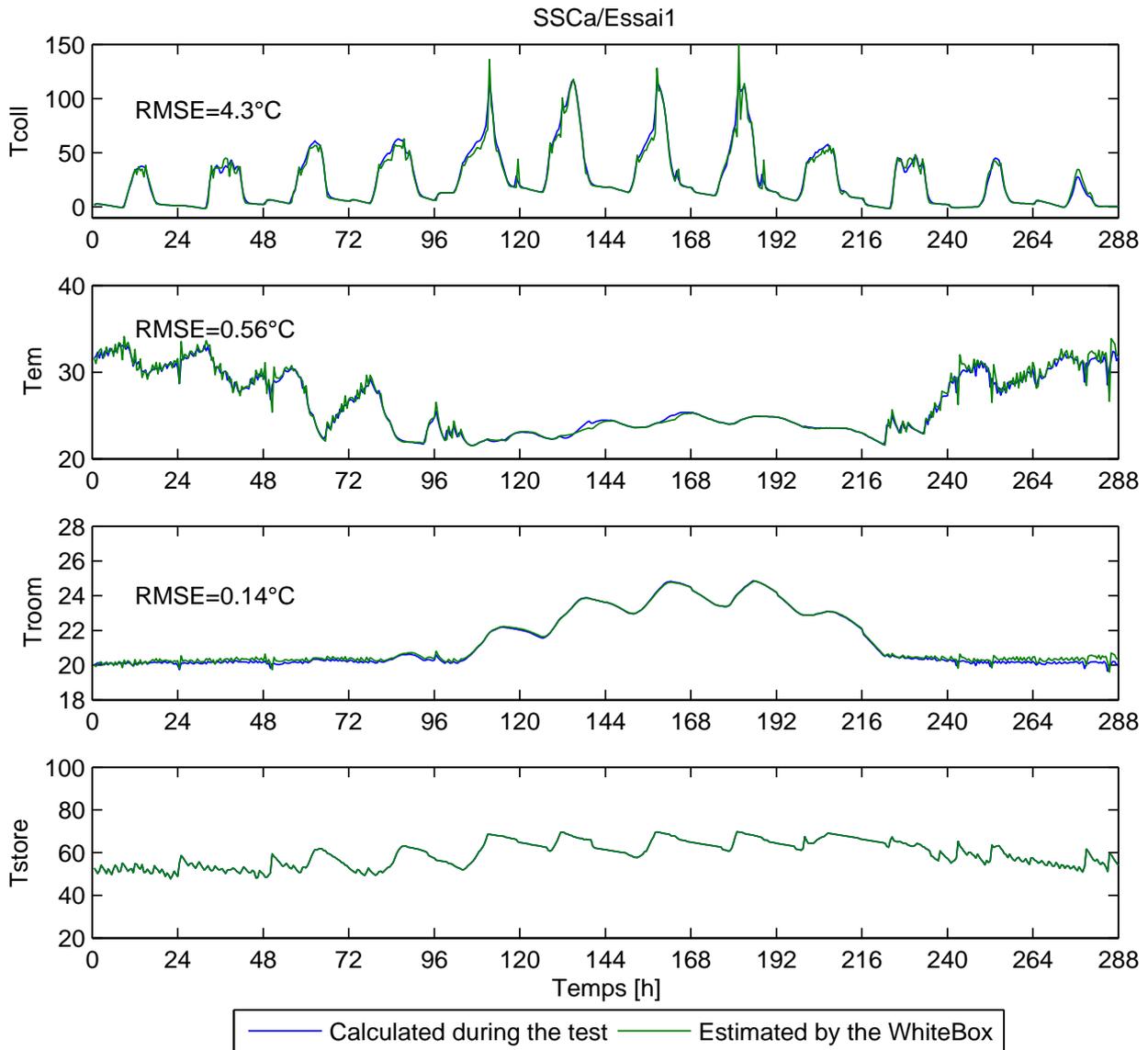


Figure 4-15 Comparaison des états du SSCa pendant la séquence d'entraînement « Essai1 » avec leur estimation par la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC

On constate que l'estimation des températures T_{coll} , T_{em} et T_{room} par la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC est très proche des températures calculées par l'environnement virtuel lors de l'Essai1. Les faibles différences proviennent à la fois de la précision des données récupérées et dans l'expression du rayonnement diffus considérée dans la partie « Boîte Blanche » (voir paragraphe 2.2.2.2). Ces observations et remarques sont valables également pour l'estimation des mêmes températures lors de l'Essai2.

Rien ne permet d'évaluer la qualité de l'estimation de T_{store} . On peut cependant remarquer que cette température est considérée comme étant assez élevée tout au long de la séquence et que ses variations ne sont pas de très grande amplitude, ce qui est assez différent de ce qui a pu être observé lors des simulations de modèles détaillés de SSC (voir paragraphe 0). Les soupçons émis sur la qualité d'estimation

de T_{store} par le modèle « Boîte Blanche » se confirment en observant cette estimation pour la séquence « Essai2 » sur la Figure 4-16.

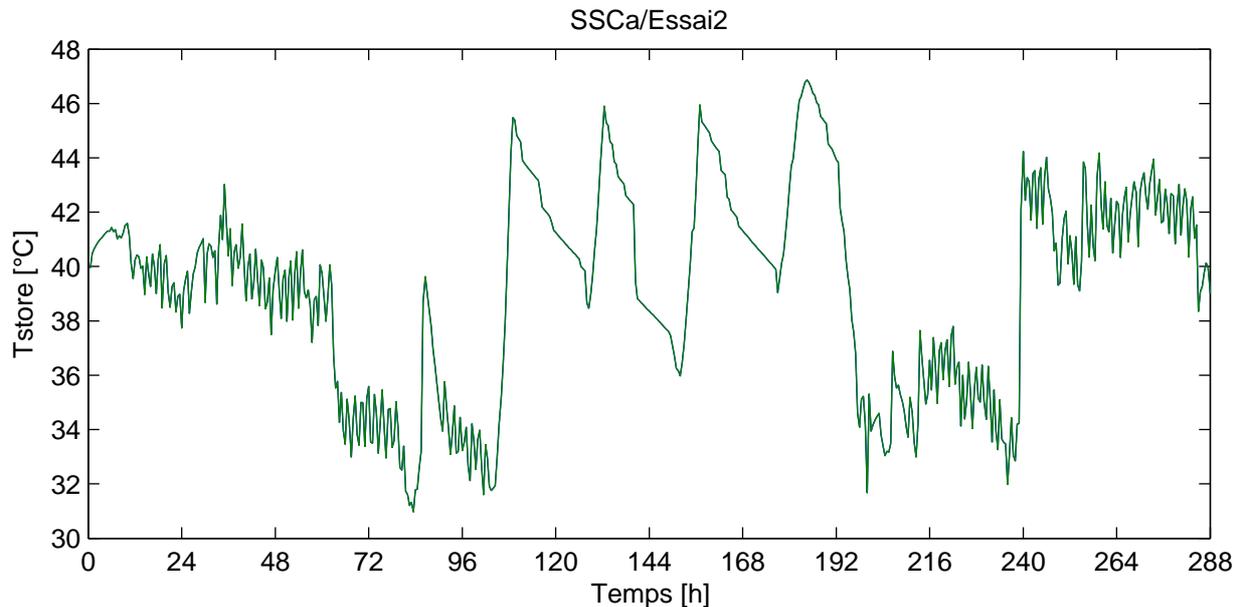


Figure 4-16 Estimation de la température moyenne du ballon de stockage du SSCa pendant la séquence d'entraînement « Essai2 » par la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC

Cette évolution ne semble vraiment pas réaliste : d'une part son profil ne correspond pas du tout à ce que l'on peut constater d'habitude dans les simulations de modèles détaillés de SSC et d'autre part, le niveau de température est très bas (bien plus bas que pour l'Essai1 du même SSC), avec de faibles variations. Le modèle de ballon de stockage envisagé, probablement trop simpliste, ne permet pas d'avoir une évaluation de la valeur réelle de T_{store} . Cependant, en ne prenant pas en compte les valeurs prises par cette température mais plutôt son évolution globale, il renseigne tout de même, d'une certaine manière, sur l'énergie stockée et sa gestion par le SSC testé. Il faut donc espérer que les réseaux de neurones arrivent à analyser correctement ces renseignements pour reproduire convenablement le comportement du système.

Par conséquent, en considérant que les valeurs réelles de T_{store} ne peuvent être estimées avec la partie « Boîte Blanche » actuelle, on peut douter de la pertinence du traitement de cette température dans le vecteur de régression (voir paragraphe 2.2.3.1). En effet, T_{store} y est simplement comparée à la température de consigne pour l'ECS (fixée à 45°C). Cette référence n'est plus vraiment justifiée et, en fonction des valeurs prises par les estimations de T_{store} , peut perturber le vecteur de régression (que l'on cherche à faire évoluer entre 0 et 1). Utiliser la température initiale du stockage $T_{store,ini}$ (calculée comme précisée dans le paragraphe 4.1.3) serait sûrement plus judicieux. Cependant, cette remarque n'a pas été exploitée ici mais elle pourrait l'être dans des études ultérieures.

La méthodologie telle que présentée dans le Chapitre2 est testée dans ce chapitre. Le vecteur de régression dans ce cas pour l'Essai1 est représenté par la Figure 4-17.

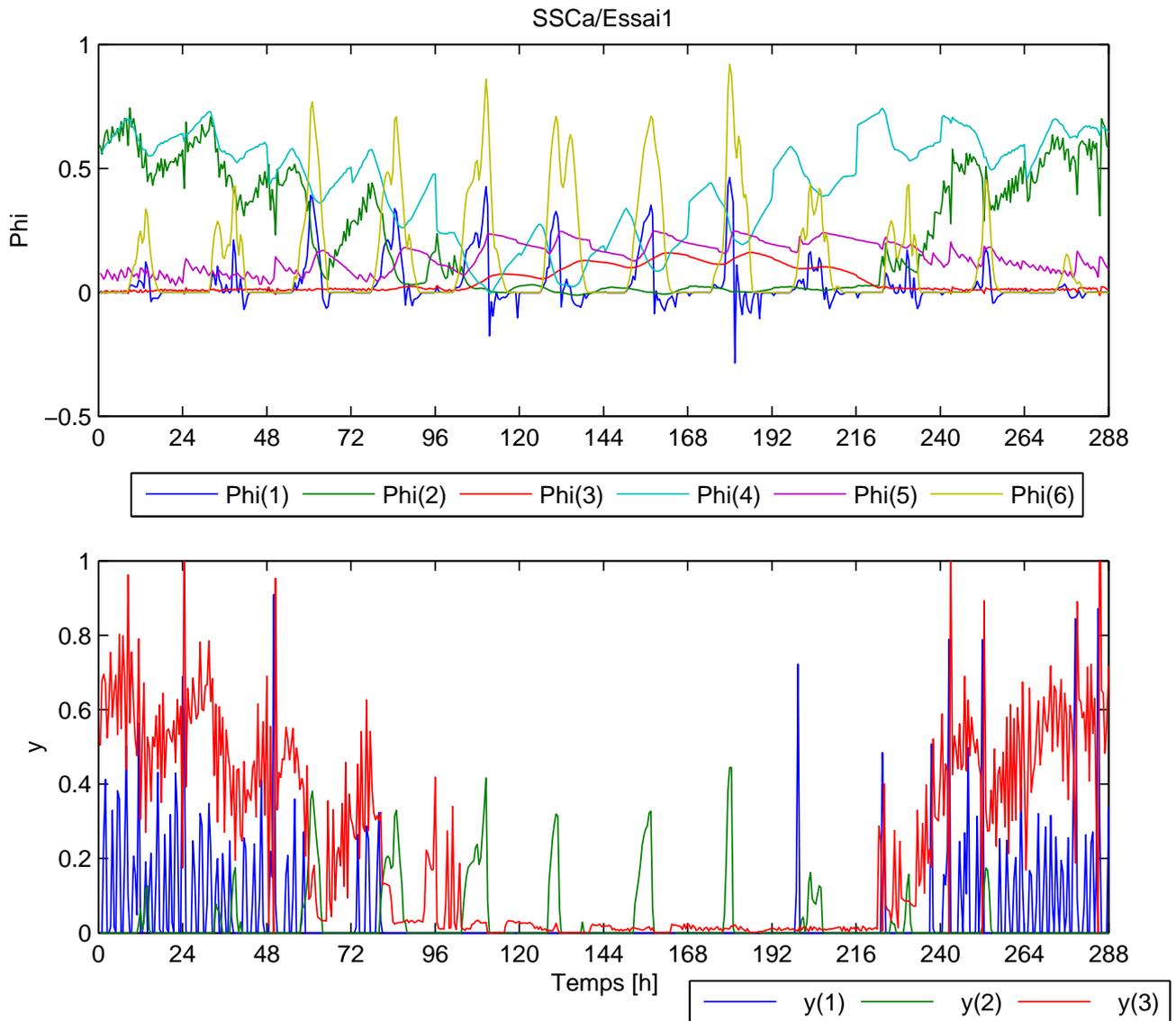


Figure 4-17 Evolution des vecteurs de régression entrées et sorties au cours de la séquence d'apprentissage issue de l'Essai1 du SSCa

Les vecteurs de régression entrées et sorties sont utilisés pour l'apprentissage de modèles « Boîte Grise » du SSCa. Pour caractériser les performances du système testé, les modèles identifiés sont soumis à 27 simulations annuelles correspondant aux environnements énergétiques présentés dans le Tableau 4-6.

Bâtiment	Climat	Surface de capteur
SFH30	Barcelone	20m ²
SFH60	Zurich	16m ²
SFH100	Stockholm	8m ²

Tableau 4-6 Environnements des séquences annuelles adoptées pour la caractérisation du SSCa

4.2.4. Résultats et caractérisation

4.2.4.1. Identification à partir de l'Essai1

La procédure d'entraînement de réseaux de neurones et de sélection d'un modèle « Boîte Grise » est appliquée 22 fois de suite à partir des données de l'Essai1.

Contrairement aux résultats obtenus dans le CHAPITRE 3 à partir de données issues de simulations numériques de modèles détaillés de SSC, il n'y a pas beaucoup de différences entre les modèles « Boîte Grise » sélectionnés à chaque application de la procédure d'entraînement.

(a) Simulation des essais réalisés

Pour apprécier dans un premier temps la qualité des modèles identifiés, nous étudions leur simulation de la seconde séquence de test Essai2 (voir le schéma de cette étude sur la Figure 4-18). Ils sont ainsi confrontés à un environnement très différent de celui dans lequel ils ont été entraînés et leurs résultats sont comparés aux variables réellement mesurées.

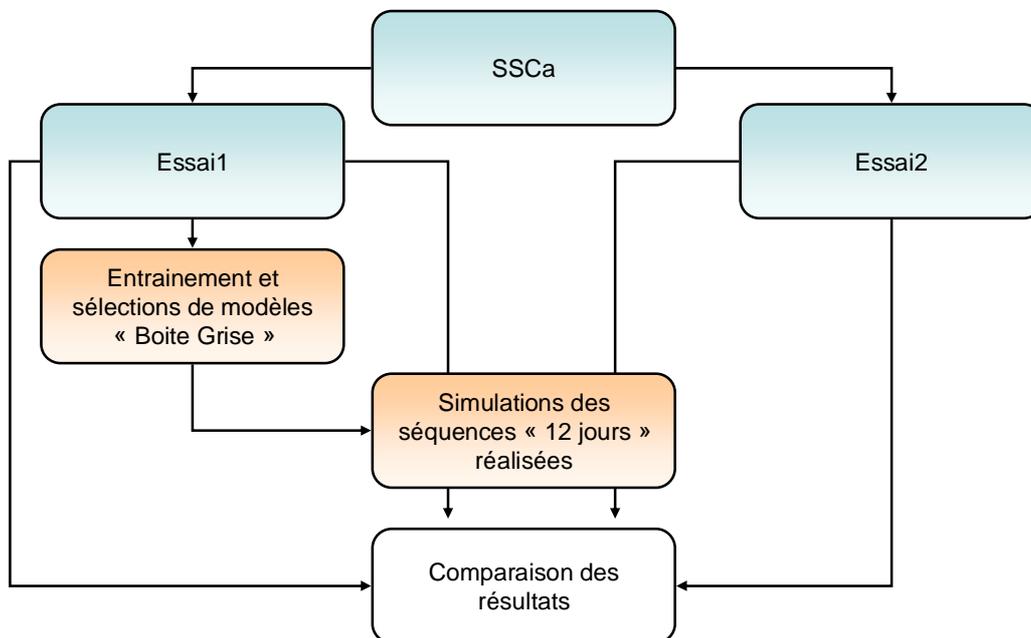


Figure 4-18 Schéma représentant le principe des résultats croisés obtenus pour le SSCa à partir de l'Essai1

Les résultats obtenus par tous les modèles identifiés à partir de l'Essai1 sont semblables pour cette étude. Ainsi les évaluations d'un seul modèle sont-ils présentés.

- Bilans d'énergie sur les séquences d'essai

CHAPITRE 4

Après simulations des deux séquences d'essai déjà réalisés sur le SSCa à l'aide du banc d'essai, les bilans d'énergie estimés et mesurés sont comparés sur la Figure 4-19.

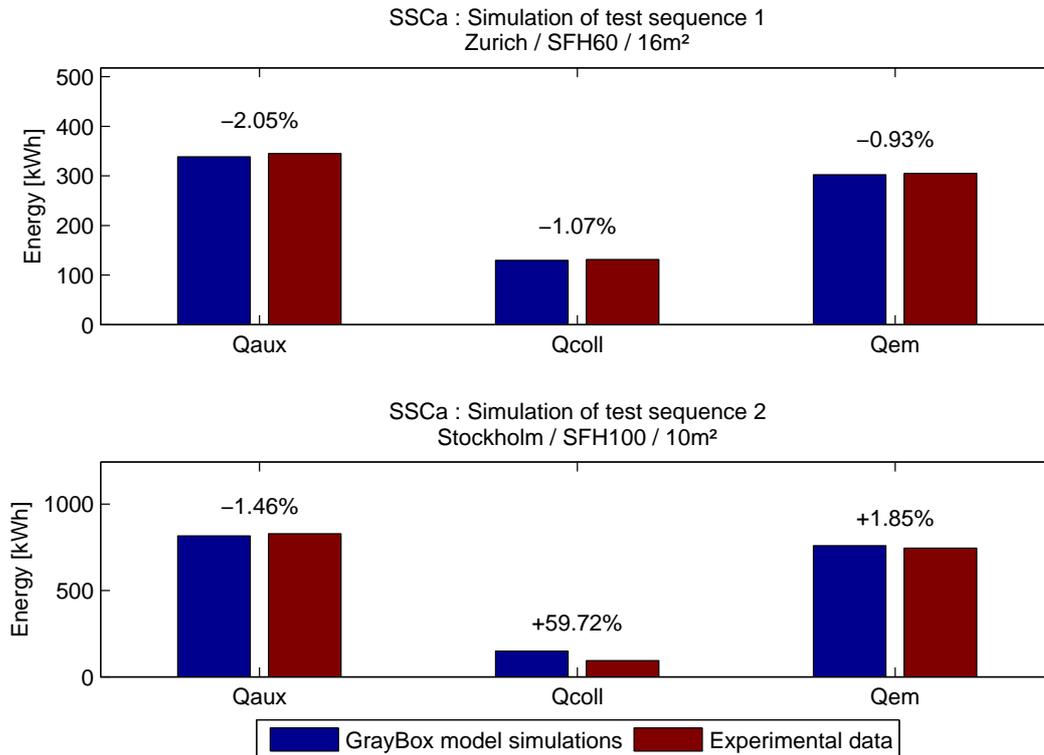


Figure 4-19 Estimation des bilans d'énergie lors de l'Essai1 et de l'Essai2 du SSCa par son modèle "Boîte Grise" (identifié à partir de l'Essai1)

Les résultats de simulation sont très proches des énergies mesurées lors des essais :

- Les paramètres du modèle ont été identifiés pour que ses résultats soient optimisés avec les données de l'Essai1. Les erreurs sont donc très faibles en toute logique pour la simulation de cet essai.
- Pour la simulation de l'Essai2, qui présente un environnement totalement différent, les différences sont très faibles, inférieures à 2%, en ce qui concerne l'estimation de la consommation en énergie d'appoint Q_{aux} et l'énergie fournie aux émetteurs de chaleur Q_{em} . Par contre, la différence relative est beaucoup plus importante en ce qui concerne l'énergie fournie par les capteurs Q_{coll} : le modèle « Boîte Grise » la surestime à plus de 50%. Il faut tout de même remarquer que compte tenu de l'environnement énergétique dans ce cas, l'apport d'énergie solaire est très faible, et que par conséquent la différence absolue (environ 50kWh) n'est pas excessive par rapport aux autres énergies mises en jeu lors de cet essai.

Les estimations d'énergie faites par tous les modèles « Boîte Grise » du SSCa sont donc satisfaisantes.

- Evolution des variables aux bornes du modèle

Pour étudier un peu plus en détail comment se déroule la simulation de l'Essai2 selon le modèle « Boîte Grise », il est possible de comparer les variables estimées par celui-ci aux variables réellement mesurées lors du test.

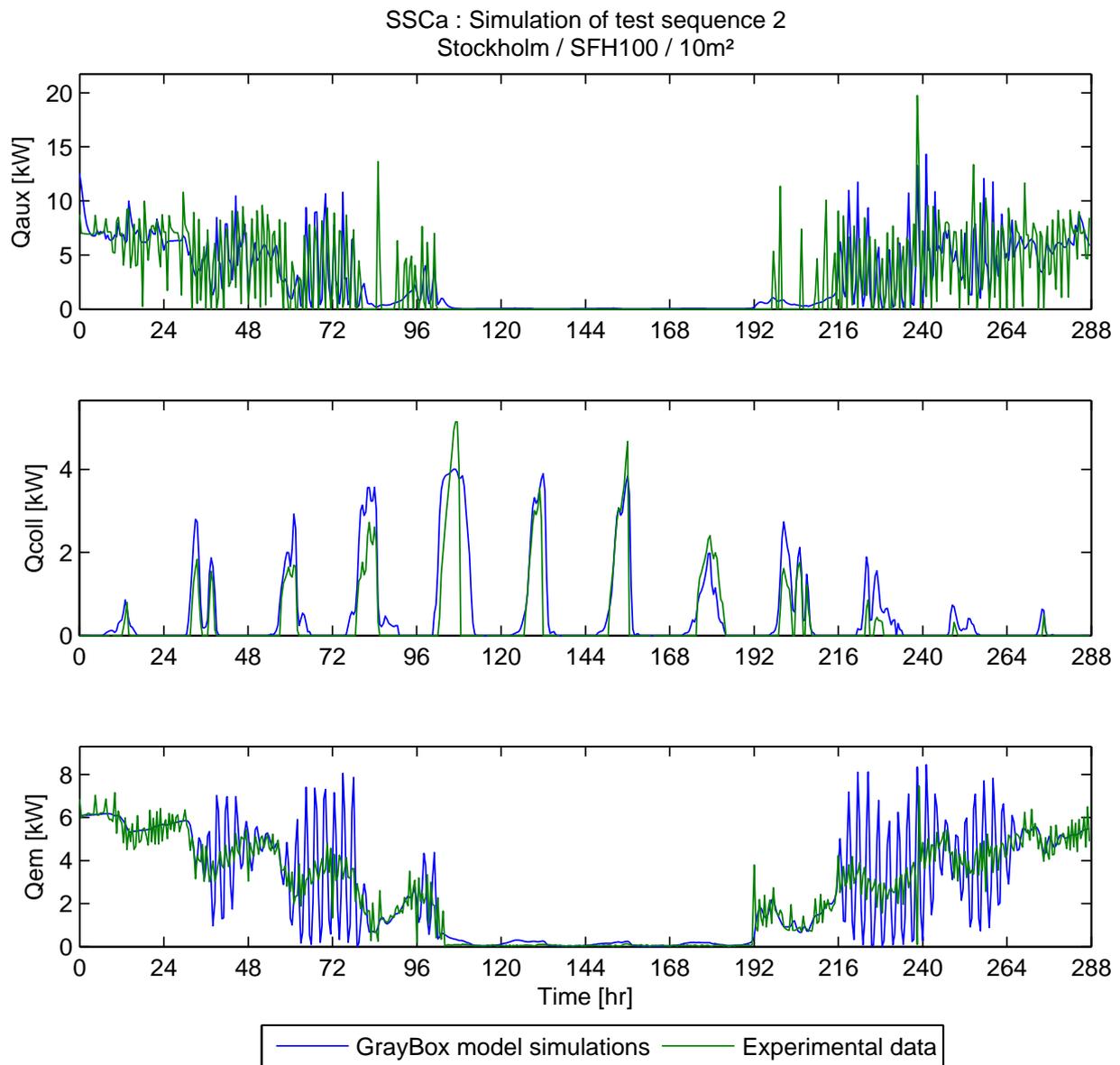


Figure 4-20 Puissances aux bornes du SSCa, estimées par le modèle "Boîte Grise" et mesurées lors de l'Essai2

La Figure 4-20 compare les évolutions estimées et mesurées des puissances aux bornes du SSCa lors de l'Essai2. Elle montre que :

- le modèle « Boîte Grise » ne simule pas fidèlement la puissance absorbée par la chaudière d'appoint \dot{Q}_{aux} mais estime un signal qui agit par moment comme une sorte de moyenne glissante et qui fournit l'évaluation globale correcte de l'énergie Q_{aux} (phénomène déjà observé lors de l'expérimentation numérique lorsque le signal \dot{Q}_{aux} est trop saccadé, voir paragraphe 3.3.2.2 par exemple) ;

CHAPITRE 4

- le profil de la puissance reçue par le circuit solaire \dot{Q}_{coll} est très grossièrement estimé par le modèle « Boîte Grise ». Les allures correspondent mais les amplitudes varient (\dot{Q}_{coll} est généralement sur-estimée), de manière très différentes selon les jours. On remarque également une certaine tendance à un peu trop anticiper la récupération d'énergie solaire. L'origine de ces observations n'est sûrement pas étrangère au fait que la température moyenne du ballon T_{store} soit estimée elle-même de manière grossière ;
- l'estimation de la puissance fournie aux émetteurs \dot{Q}_{em} semble perturbée pour certains jours mais, comme dans le cas de \dot{Q}_{aux} , cette estimation maintient une valeur globale correcte de l'énergie Q_{em} . Ce phénomène est également observé lors de la simulation de l'Essai1, pour les mêmes journées de la séquence, mais de manière moins prononcée. Il semblerait que les poids synaptiques identifiés par l'algorithme d'optimisation lors de la procédure d'entraînement rendent le modèle complet très sensible aux variations de température extérieure et de température intérieure, ce qui peut entraîner les instabilités observées.

Les conséquences (et également causes) des phénomènes observés ci-dessus sont visibles sur l'état du système tout au long de la simulation (Figure 4-21).

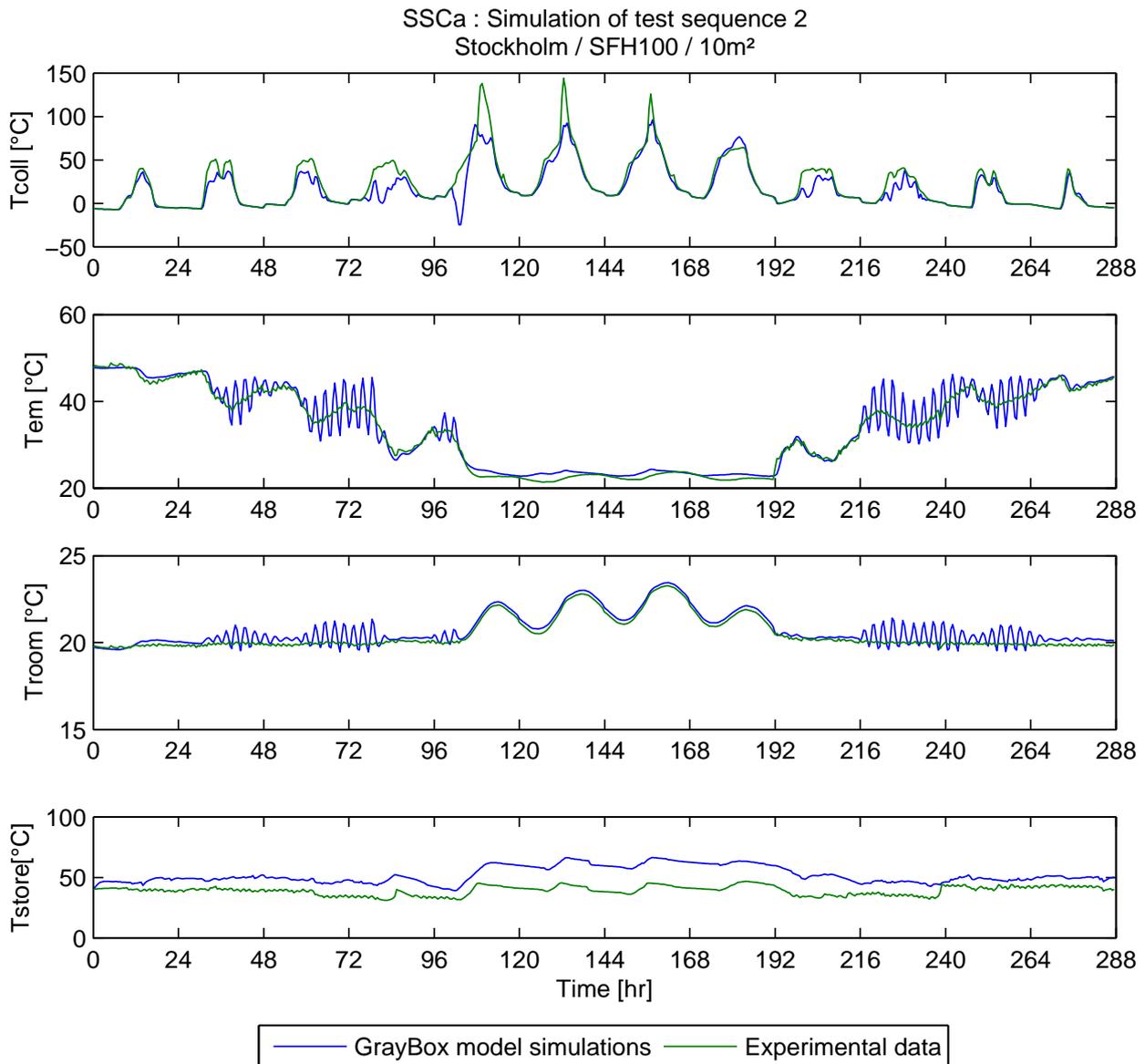


Figure 4-21 Température d'état du SSCa, estimées par le modèle "Boîte Grise" et mesurées lors de l'Essai2

Ainsi les évolutions de T_{room} et T_{em} sont-elles perturbées par le phénomène observé sur la puissance \dot{Q}_{em} . On remarque également que T_{coll} est globalement sous évaluée et que son estimation peut même atteindre des valeurs négatives aberrantes comme lors de la cinquième journée.

Le profil de T_{store} estimé par le modèle « Boîte Grise » est différent de celui évalué dans le traitement initial des données de l'Essai2 (voir le paragraphe 4.2.3). Ce modèle semble restituer un profil semblable à celui observé lors de sa séquence d'entraînement. C'est ce qui explique notamment la surestimation de la puissance \dot{Q}_{aux} en début de séquence (qui permet d'augmenter la température moyenne du ballon au même niveau que lors de l'Essai1).

Finalement, l'évolution de l'ensemble des variables n'est pas précisément respectée mais les principales tendances sont bien retransmises par le modèle « Boîte Grise », ce qui lui permet d'estimer correctement les bilans d'énergie. Les instabilités remarquées sur \dot{Q}_{em} pourront cependant poser d'éventuels problèmes lors des simulations annuelles si celles-ci venaient à s'amplifier sur de longues périodes.

(b) Caractérisation du SSCa

Les modèles identifiés sont soumis aux environnements présentés dans le Tableau 4-6 lors de simulations annuelles pour caractériser le SSCa. Quel que soit le modèle parmi les 22 sélectionnés, tous présentent une différence absolue moyenne MAE_{ref} , entre les estimations de l'énergie fournie aux radiateurs Q_{em} et les besoins de chauffage de référence $Q_{em,ref}$ (voir paragraphe 3.1.3.3), très faible, de l'ordre de 270kWh. Les différencier à ce stade est donc très difficile.

Pourtant, l'estimation des performances annuelles du SSCa diffère selon le modèle. On distingue parmi ceux-ci deux grandes familles de modèles :

- La première famille, qu'on appellera par la suite « Famille1 », est la plus représentée (quasiment les trois quarts de l'ensemble des modèles sélectionnés). Elle présente un critère MAE_{ref} très légèrement inférieur (de 0,5kWh) par rapport à celui de l'autre famille.
- La deuxième famille, que l'on appellera « Famille2 », compte beaucoup moins de modèles (environ un quart de la totalité) et présente un critère MAE_{ref} un peu moins bon (mais qui reste très correct).

Les modèles des deux familles donnent des résultats semblables sur la simulation des séquences « 12 jours » (voir ci-dessus). Ils se différencient lors des simulations annuelles, et notamment lors de la simulation annuelle de l'environnement correspondant à leur séquence d'entraînement (Essai1). La consommation annuelle d'énergie d'appoint ainsi estimée par les deux familles de modèle est comparée à l'extrapolation « classique » de la méthode SCSPT originale sur les résultats de l'Essai1 (qui consiste à simplement multiplier l'énergie consommée lors des 12 jours de tests par un facteur 365/12, voir paragraphe 1.2.2).

	Extrapolation des résultats bruts de l'Essai1	Simulation annuelle à l'aide des modèles « Boîte Grise »	
		« Famille1 »	« Famille2 »
Estimation de l'énergie annuelle Q_{aux}	10502 kWh	9970 kWh	10326 kWh

Tableau 4-7 Estimation de la consommation annuelle en énergie d'appoint du SSCa pour l'environnement de l'Essai1 selon la méthode « SCSPT classique » actuelle et selon les simulations des modèles identifiés

En considérant que la méthode d'extrapolation est vérifiée (même avec l'erreur de paramétrage des émetteurs de chaleur), l'ensemble des modèles sélectionnés ont tendance à sous-estimer la consommation annuelle du SSCa. La sous-estimation des résultats est cependant plus prononcée pour les modèles de la « Famille1 » (de

5,4%) que pour ceux de la « Famille2 » (de 1,7%). A l'aide de cette comparaison, la sélection d'un modèle final conduirait à privilégier la « Famille2 ». Toutefois, le lien entre ce critère, qui teste une seule simulation, et la fiabilité des résultats du modèle pour toute simulation annuelle, n'est pas évident.

La courbe caractéristique obtenue en appliquant la méthode FSC (voir paragraphe 1.1.3.3) aux données des multiples simulations des modèles des deux familles confirme ces observations (Figure 4-22).

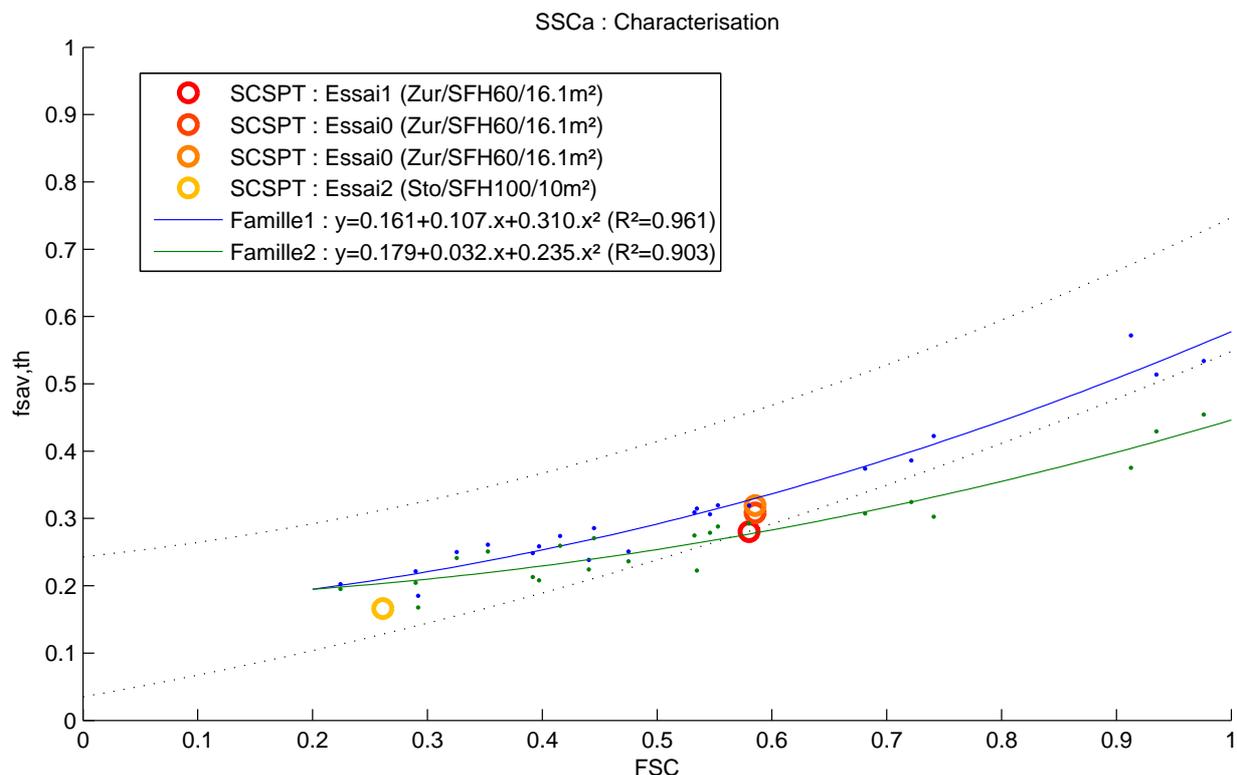


Figure 4-22 Caractérisation du SSCa selon les deux familles de modèles "Boîte Grise" identifiées à partir de l'Essai1

Il faut tout d'abord noter que, comme prévu, les points expérimentaux obtenus à partir de la nouvelle version de la méthode SCSPT (Essai1 et Essai2) sont légèrement en deçà de ceux obtenus par la méthode SCSPT original (Essai0). Cet écart est la conséquence de la différence de dimensionnement des émetteurs dans les environnements virtuels (voir paragraphe 4.2.2.2). Les entraînements et les simulations des modèles « Boîte Grise » ont été réalisés avec le même dimensionnement d'émetteur que pour l'Essai1 et l'Essai2.

La différence entre les courbes caractéristiques obtenues selon les deux familles de modèles s'accroît lorsque le nombre FSC augmente : les taux d'économie d'énergie $f_{sav,th}$ estimés par les deux familles de modèles sont proches pour $FSC < 0,5$, les estimations divergent pour des taux FSC supérieurs. La distinction entre les deux familles se fait principalement pour des environnements à fort potentiel de récupération d'énergie solaire. Leurs estimations s'accordent mieux pour les autres environnements.

Les prévisions de la « Famille1 » sont plus optimistes. Elles semblent se rapprocher des résultats des essais du type Essai0 mais cette observation relève plus de la coïncidence : les modèles étant entraînés et simulés avec des émetteurs de chaleur sous-dimensionnés, ils devraient évaluer des performances légèrement inférieures. Il semblerait donc que la « Famille2 » évalue des performances un peu plus réalistes par rapport aux données expérimentales. Mais à l'heure actuelle, il est encore impossible d'écarter ou de valider l'une de ces deux courbes de manière fiable. Il faudra donc compléter la méthodologie proposée dans cette étude pour obtenir une caractérisation unique des SSC testés.

Nous allons tout de même vérifier la cohérence de ces résultats en réalisant la même étude à partir des données de l'Essai2.

4.2.4.2. Identification à partir de l'Essai2

La procédure d'entraînement de réseaux de neurones et de sélection d'un modèle « Boîte Grise » est appliquée 22 fois de suite à partir des données de l'Essai2. Encore une fois, très peu de groupes modèles différents apparaissent lors de cette série : on distingue dans ce cas trois « familles » de modèles différentes.

(a) Simulation des essais réalisés

De la même manière que dans le paragraphe 4.2.4.1, on procède tout d'abord à un « croisement » des résultats à partir de simulations des différentes séquences de test. L'algorithme de cette étude est présenté sur la Figure 4-23.

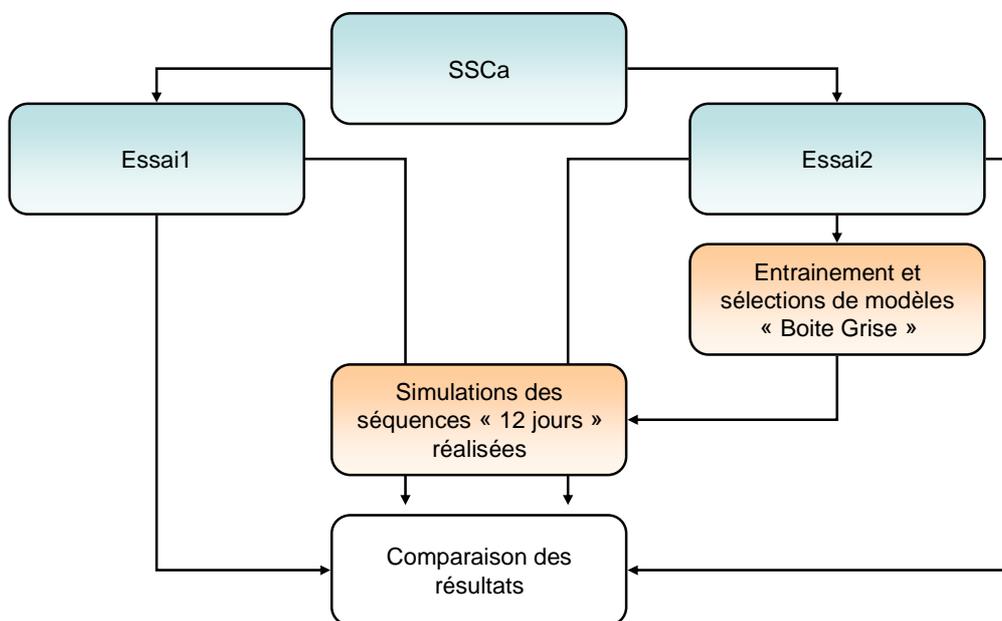


Figure 4-23 Schéma représentant le principe des résultats croisés obtenus pour le SSCa à partir de l'Essai2

Les résultats diffèrent légèrement selon la « famille » de modèles considérée et notamment sur les bilans d'énergie estimés aux bornes du SSCa lors des deux essais (voir Figure 4-24).

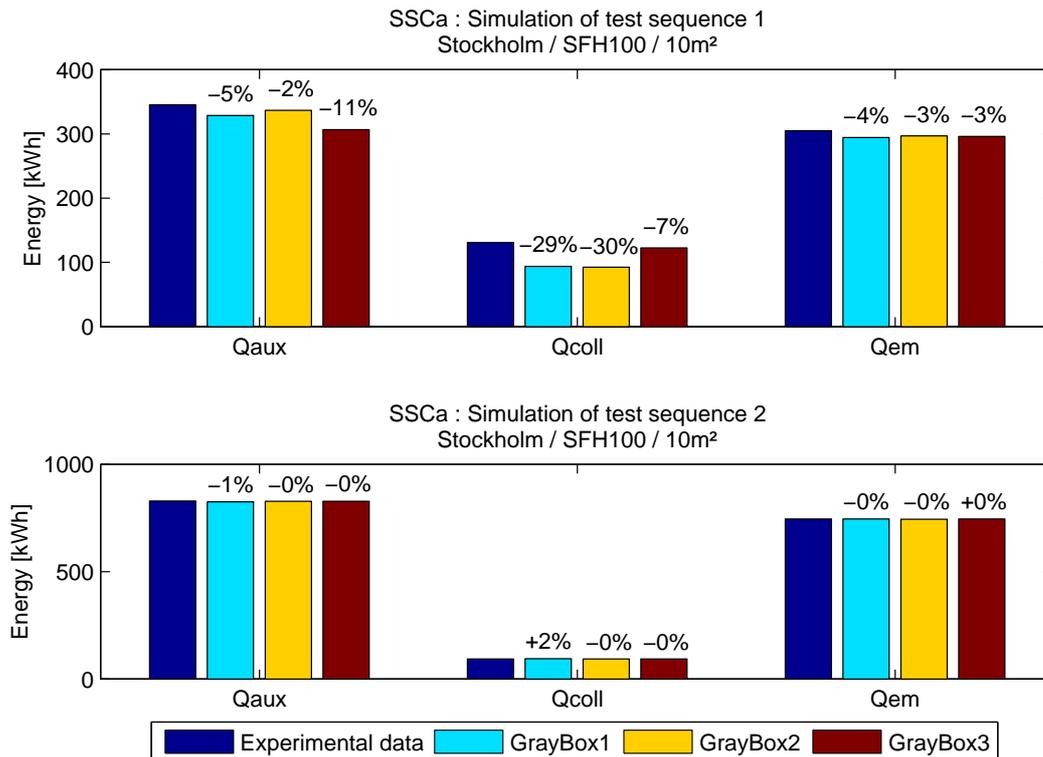


Figure 4-24 Estimation des bilans d'énergie lors de l'Essai1 et de l'Essai2 du SSCa par ses différents modèles "Boîte Grise" (identifiés à partir de l'Essai2)

Les simulations de l'Essai2 (graphique inférieur) présentent de très faibles erreurs, d'estimations des énergies aux bornes du SSCa, quelle que soit la « famille » de modèle, car ce sont ces données qui ont servi de base d'entraînement des réseaux de neurones.

Lors des simulations de l'Essai1 (graphique supérieur), l'énergie fournie aux émetteurs Q_{em} est globalement bien estimée par tous les modèles sélectionnés. La « Famille1 » et la « Famille2 » semble plus apte à estimer Q_{aux} alors que la « Famille3 » commet moins d'erreur sur l'estimation de Q_{coll} .

Pourtant, cela ne signifie pas que la « Famille3 » évalue mieux la puissance reçue du circuit solaire \dot{Q}_{coll} tout du long de la simulation. Pour tous les modèles, l'estimation de \dot{Q}_{coll} est assez différente de celle mesurée, chacun se distinguant par la manière de gérer cette puissance jour après jour, comme le montre la Figure 4-25.

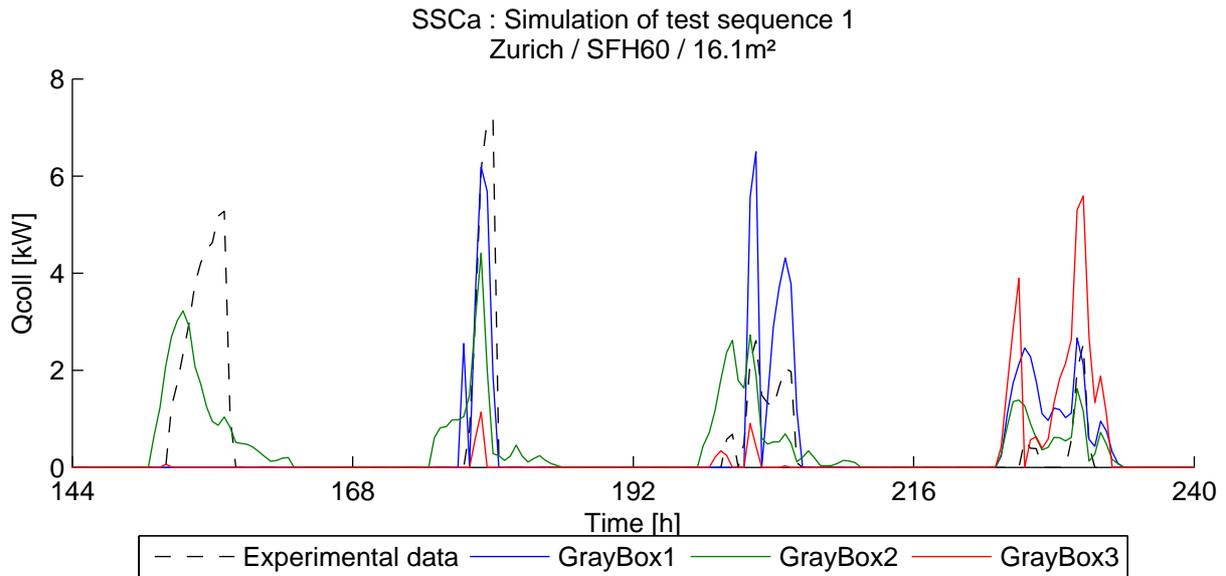


Figure 4-25 Puissance fournie par les capteurs au SSCa, estimées par les modèles "Boîte Grise" et mesurées lors de quatre jours de l'Essai2

Cette différence de traitement des puissances au sein du SSCa vient très probablement de leur propre gestion de la température moyenne du stockage T_{store} (voir Figure 4-26).

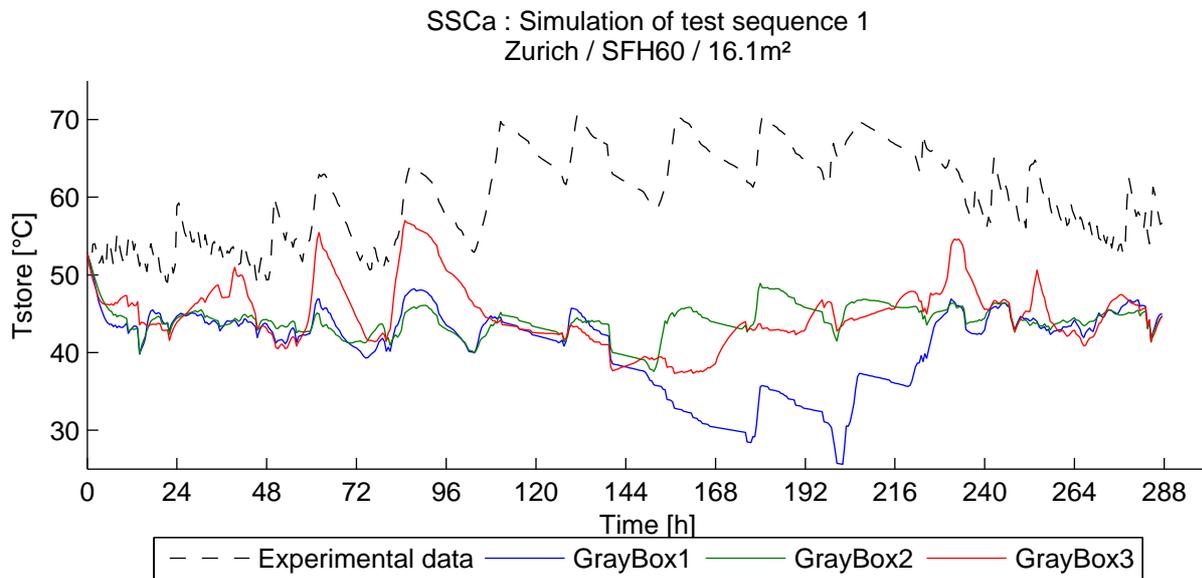


Figure 4-26 Température moyenne du ballon de stockage du SSCa, estimées par les modèles "Boîte Grise" et par le traitement initial des données expérimentales de l'Essai2

Pour tous les modèles, le profil de température T_{store} suit une allure qui ressemble à celle estimée pour la séquence d'entraînement et qui n'est absolument pas réaliste (voir le traitement des données paragraphe 4.2.3). Mais les estimations des puissances en sortie des modèles (\dot{Q}_{aux} , \dot{Q}_{coll} et \dot{Q}_{em}) se font tout de même sur cette base et permettent une évaluation correcte des énergies aux bornes du SSCa lors de l'Essai1.

En ce qui concerne les autres variables, les remarques faites lors de l'étude précédente des modèles « Boîte Grise » du SSCa entraînés à partir de l'Essai1 (voir paragraphe 4.2.4.1) sont également valables dans ce cas, excepté le fait qu'aucune instabilité de \dot{Q}_{em} n'est visible ici. Les poids synaptiques identifiés doivent rendre le modèle « Boîte Grise » moins sensible à certaines variations de température dans ce cas.

(b) Caractérisation du SSCa

Comme dans le cas précédent, les modèles identifiés sont soumis aux environnements présentés dans le Tableau 4-6 lors de simulations annuelles pour caractériser le SSCa. Encore une fois, tous les modèles sélectionnés présentent une erreur absolue moyenne MAE_{ref} très proche, autour de 100kWh. Il est donc difficile de les différencier à partir de ce critère.

On compare également de la même manière la consommation annuelle d'énergie d'appoint estimée par les trois familles de modèle et l'extrapolation « classique » de la méthode SCSPT originale sur les résultats de l'Essai2 (Tableau 4-9).

	Extrapolation des résultats bruts de l'Essai2	Simulation annuelle à l'aide des modèles « Boîte Grise »		
		« Famille1 »	« Famille3 »	« Famille2 »
Estimation de l'énergie annuelle Q_{aux}	25207kWh	24201kWh	24422kWh	24550kWh

Tableau 4-8 Estimation de la consommation annuelle en énergie d'appoint du SSCa pour l'environnement de l'Essai2 selon la méthode « SCSPT classique » actuelle et selon les simulations des modèles identifiés

Tous les modèles estiment une consommation en énergie d'appoint plus faible que l'extrapolation classique. L'écart est légèrement plus prononcé pour la « Famille1 » (environ 4%). Discriminer les modèles à l'aide de cette comparaison n'est toujours pas évident comme nous l'avions déjà remarqué précédemment.

Pourtant, les courbes caractéristiques obtenues par la méthode FSC (voir paragraphe 1.1.3.3) ont des allures différentes selon les modèles considérés (voir Figure 4-22).

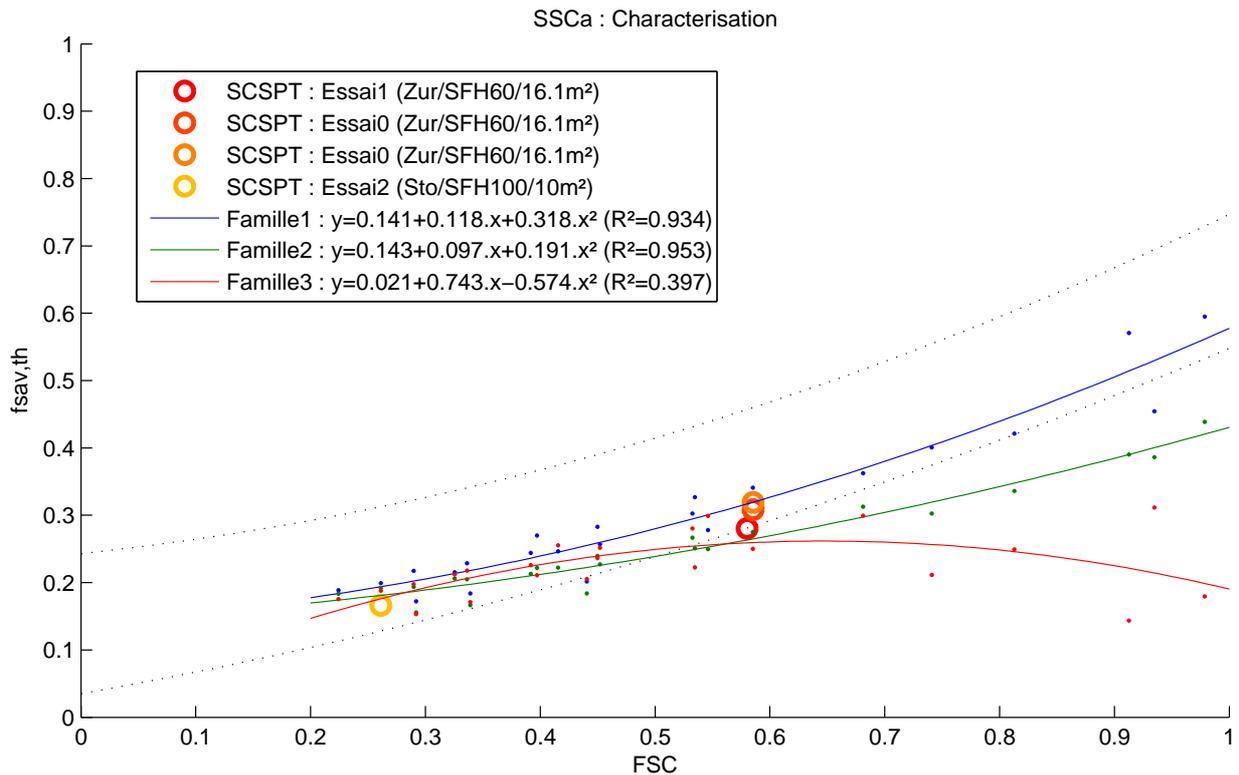


Figure 4-27 Caractérisation du SSCa selon les trois familles de modèles "Boîte Grise" identifiées à partir de l'Essai2

On remarque que les performances estimées par les trois familles de modèles sont assez proches pour des simulations annuelles dont le taux FSC est inférieur à 0,5 (surtout pour les modèles de la « Famille2 » et de la « Famille3 »). Les prévisions pour des environnements à plus fort potentiel d'économie d'énergie changent complètement selon le type de modèle :

- Les modèles de la « Famille3 » montrent très clairement des difficultés lors des simulations annuelles puisque les taux $f_{sav,th}$ sont très dispersés quand FSC est élevé, ce qui donne à la courbe caractéristique une allure irréaliste par rapport aux courbes obtenues pour d'autres SSC ;
- Les courbes obtenues par les modèles des deux autres familles ont des allures plus « normales ». Celles issues des modèles de la « Famille1 » sont globalement plus optimistes sur les performances du SSCa que celles issues des modèles de la « Famille2 ». Malheureusement, il n'est pas possible de valider ou d'écarter clairement l'une de ces deux courbes obtenues.

Ces résultats montrent que la méthodologie proposée dans son état actuel ne permet pas de caractériser le SSC testé de manière unique. Pour cela, une étape supplémentaire ou un traitement différent des données doit être envisagé. Cependant, on remarque une certaine concordance des estimations de performances annuelles pour une certaine plage de taux FSC , quel que soit le type du modèle sélectionné. On pourrait donc envisager de ne considérer que les résultats obtenus sur une certaine plage de validité, en fonction de l'environnement virtuel adopté pour l'essai (par exemple, pour des FSC allant de 0,2 à 0,6 dans le cas de l'Essai2 par exemple).

4.2.4.3. Comparaison des modèles identifiés à partir de deux essais

Malgré l'absence de caractérisation unique du SSCa, l'autre point important qui ressort de l'ensemble des résultats est que les courbes caractéristiques obtenues à partir de modèles entraînés avec l'Essai2 sont cohérentes avec celles obtenues à partir de modèles entraînés avec l'Essai1 (voir paragraphe 4.2.4.1 et Figure 4-28).

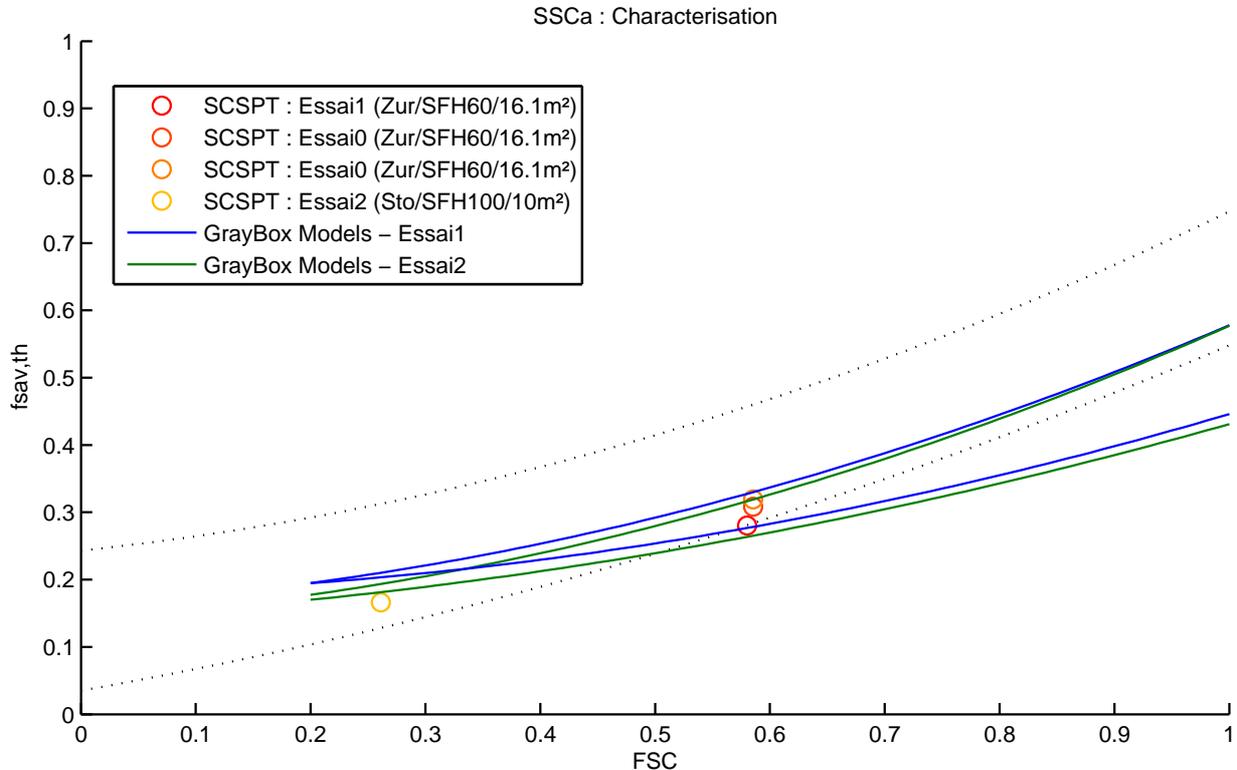


Figure 4-28 Caractérisation du SSCa selon les familles de modèles "Boîte Grise" identifiées à partir de l'Essai1 et de l'Essai2

Cette observation soulève les remarques suivantes :

- L'approche envisagée semble donc cohérente puisqu'à partir de deux séquences totalement différentes appliquées à un même SSC, les modèles identifiés présentent des résultats similaires ;
- Bien que les profils de températures moyennes de ballon T_{store} soient très différents entre les deux séquences d'entraînement des réseaux de neurones (voir paragraphe 4.2.3), les modèles entraînés et sélectionnés sont similaires. Ceci montre que le profil réel de température n'est pas nécessaire à l'apprentissage d'un modèle convenable. Les réseaux semblent gérer correctement l'évaluation des puissances aux bornes du SSC pourvu que le paramétrage du ballon et de l'appoint reste le même pour les simulations ;
- L'environnement de la séquence de test pour l'essai n'est pas forcément figé pour avoir un entraînement optimal de réseaux de neurones. Cependant, l'influence du fonctionnement propre au SSC ne doit pas être négligeable dans ces résultats (comme nous l'avons déjà évoqué dans le paragraphe 3.4). Tout dépend de la sollicitation des variables d'étude lors de la séquence d'essai.

4.3. Tests du SSCb

4.3.1. Description du système

4.3.1.1. Conception, fonctionnement du SSCb et remarques sur son installation pour les tests

Le deuxième système testé, le SSCb, est un prototype du même fabricant que le SSCa (voir 4.2.1). Son fonctionnement est semblable au premier système. Sa principale différence est une capacité de stockage moindre (750 litres). Selon la classification Combisol (voir paragraphe 1.1.1.3), le SSCb est également du type B1 (voir Figure 4-9).

L'installation de ce système sur le banc d'essai d'INES a posé beaucoup moins de difficultés que celle du SSCa puisque le SSCb est un système beaucoup plus compact que le précédent (voir Figure 4-29).



Figure 4-29 Photo du SSCb installé sur le banc d'essai thermique semi-virtuel

En effet, l'ensemble des circuits hydrauliques est « pré-monté » en usine et toutes les régulations (solaire, émetteurs et appoint) sont centralisées sous une seule interface. Pour les premiers tests du SSCb, il a donc suffi :

- D'installer la chaudière d'appoint sur le système ;
- De réaliser les câblages électriques entre la chaudière et le système selon la documentation fournie par le fabricant.

4.3.1.2. Paramétrage du modèle « Boîte Grise » pour le SSCb

Les paramètres caractérisant l'environnement du SSCb et celui de ses capteurs sont les mêmes que pour le SSCa (voir paragraphe 4.2.1.2).

Pour les éléments réellement présents pendant la phase de test, les seuls paramètres à changer par rapport au SSCa concernent le ballon et les différents circuits hydrauliques (la même chaudière d'appoint est utilisée) :

- Le ballon a un volume de 750L ;
- Bien qu'intégrés au système, le circuit du système d'appoint et celui du chauffage présentent des appareils et des longueurs de canalisation qui peuvent être plus importants d'un point de vue des pertes thermiques. On estime par conséquent que chacun de ces deux circuits est constitué de tuyaux en cuivre ($\lambda_w = 372 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), d'une longueur de 2m, isolés par une épaisseur de 20mm d'isolant flexible en mousse élastomère ($\lambda_{iso} = 0.042 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

En prenant en compte ces observations et à l'aide des formules du paragraphe 4.1.2, le paramétrage de la partie « Boîte Blanche » du modèle global du SSCb est présenté dans la Tableau 4-9 ci-après :

Capteur	Stockage	Appoint
$\beta = 45^\circ$	$C_{store} = 3,14.10^6 \text{ J.K}^{-1}$	$Type = 102$
$\gamma = 0^\circ$	$(UA)_{store} = 6,58 \text{ W.K}^{-1}$	$Regul = 3$
$alb = 0,2$	$T_{amb,store} = 18^\circ\text{C}$	$Ventil = 1$
$F'(\tau\alpha)_{en} = 0,8$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24.10^3 \text{ W}$	$\dot{Q}_{aux,nom} = 24.10^3 \text{ W}$
$K_{\theta l} = 0,9$	$T_{aux,hot,nom} = 80^\circ\text{C}$	$T_{amb,aux} = 18^\circ\text{C}$
$b_0 = 0,2$	$T_{aux,cold,nom} = 60^\circ\text{C}$	$T_{em,in,d}^* = 40^\circ\text{C}$
$c_1 = 3,50 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$T_{set,dhw} = 45^\circ\text{C}$	$T_{a,d}^* = -10^\circ\text{C}$
$c_2 = 0,015 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-2}$	$(UA)_{aux,loop,hot} = 0,65 \text{ W.K}^{-1}$	$T_{set,room} = 20^\circ\text{C}$
$c_3 = 0 \text{ W.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{aux,loop,cold} = 0,65 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_4 = 0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_5 = 7000 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$(UA)_{coll,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
$c_6 = 0 \text{ s.m}^{-1}$	$(UA)_{em,loop,hot} = 0,65 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{em,loop,cold} = 0,65 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,hot} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	
	$(UA)_{dhw,loop,cold} = 0 \text{ W.K}^{-1}$	

Tableau 4-9 Paramètres du SSCb pour son modèle "Boîte Grise" (les valeurs des paramètres marqués * changent en fonction de l'environnement et correspondent ici à l'environnement d'entraînement)

4.3.2. Installation et essais

4.3.2.1. Essais réalisés selon la méthode « SCSPT classique »

Le SSCb a d'abord été testé selon la méthode « SCSPT classique » (voir paragraphe 1.2.2). Trois essais consécutifs ont été effectués pour étudier la répétitivité de la démarche. L'environnement virtuel pour ces tests est celui présenté dans le Tableau 4-10.

Nom de l'essai	Bâtiment	Climat	Surface de capteur
Essai0	SFH60	Zurich	16,1m ²

Tableau 4-10 Environnement virtuel des essais SCSPT « classiques » du SSCb

Il n'y a eu aucun souci lors du déroulement du premier et troisième test. Une coupure d'électricité générale dans la halle technique accueillant les cellules de test est intervenue lors du 2^e essai. Celui-ci a immédiatement été repris après rétablissement de l'alimentation électrique ce qui a finalement provoqué une interruption de 30 minutes du fonctionnement de l'essai. La reprise a été faite avec un état différent du système (notamment du ballon de stockage) et de son environnement (notamment du bâtiment). Cette « rupture » de l'état du système en milieu d'essai entraîne donc des différences dans les résultats obtenus (comme on peut le voir sur la Figure 4-30).

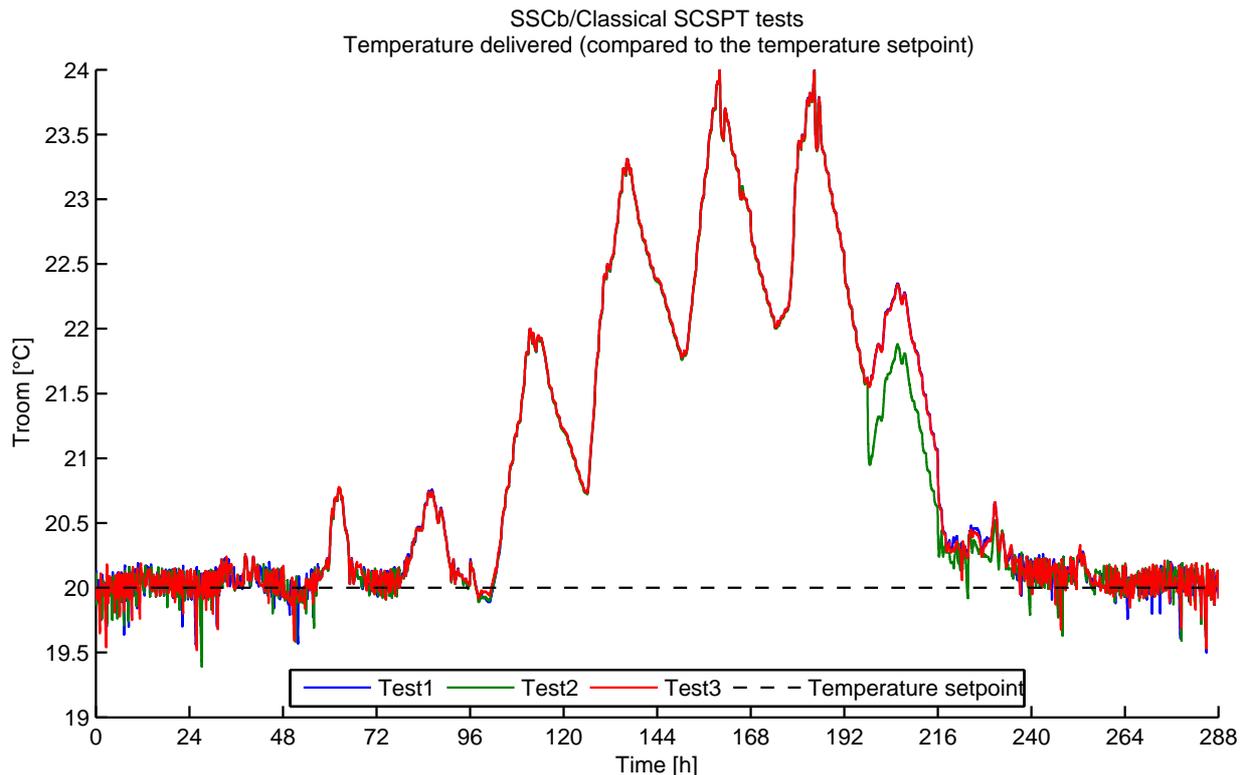


Figure 4-30 Température de l'air intérieur délivrée par le SSCb lors de trois tests consécutifs du type « Essai0 », comparées à leur température de consigne respective

La coupure survenue lors de la deuxième application de l'Essai0 a entraîné un léger décrochage de la température de l'air intérieur T_{room} au neuvième jour de la séquence. Hormis cette observation, les températures évoluent sensiblement de la même manière quel que soit le test ce qui démontre que la méthode est répétable quand aucun problème ne survient durant la séquence. En période de chauffe, T_{room} est légèrement supérieure à sa température de consigne (aux alentours de 20,1°C).

Dans cette configuration, le SSCb fourni de l'ECS à température T_{DHW} un peu plus élevée que sa consigne (aux alentours de 48°C).

Les défauts de régulation de chacun des modules hydrauliques n'engendrent pas de différences considérables entre les énergies calculées sous TRNSYS et les énergies réellement mesurées aux bornes du SSCb pendant les essais « SCSPT classiques » (de type Essai0). Le Tableau 4-12 montre les énergies relevées pour l'environnement virtuel et pour le système réel lors des 3 lancements de l'Essai0 du SSCb.

CHAPITRE 4

N°essai (Essai0)	Qaux			Qem			Qcoll			Qdhw		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Energie calculée [kWh]	-	-	-	285	293	285	123	127	124	98	97	98
Energie mesurée [kWh]	323	331	325	284	293	285	124	127	125	95	95	95
Erreur [%]	-	-	-	0,30	-0,19	-0,02	-1,3	-0,10	-0,28	2,48	2,42	2,88

Tableau 4-11 Energies calculées au niveau de l'environnement virtuel et mesurées aux bornes du système lors des 3 applications de l'Essai0 du SSCa

4.3.2.2. Essais réalisés selon la méthode « SCSPT modifiée »

Le SSCb a été soumis à des essais de type « SCSPT modifiée » bien plus tard, après démontage et remontage d'une partie de son matériel. Il y a donc une forte probabilité pour que son comportement soit légèrement différent lors de cet essai par rapport aux essais « SCSPT classiques » (variations possibles dans la position et la sensibilité des sondes, dans les réglages manuels des vannes et circulateurs,...).

Un premier essai (Essai original présenté ci-dessous) a pu être réalisé sur le SSCb et traité intégralement. Deux essais complémentaires ont été lancés à la fin de ces travaux de recherche pour enrichir les résultats obtenus à l'aide de cette nouvelle méthodologie. Par manque de temps, ces derniers n'ont pas fait l'objet d'études détaillées mais présentent des résultats de caractérisation du système intéressants (voir paragraphe 4.3.4.3).

(a) Essai original

L'environnement virtuel du premier essai réalisé sur le SSCb est présenté dans le Tableau 4-12.

Nom de l'essai	Bâtiment	Climat	Surface de capteur
Essai1	SFH100	Zurich	16,1m ²

Tableau 4-12 Environnements virtuels des essais « SCSPT modifiée » du SSCb

Il a été décidé de ne pas étudier le comportement du SSC pour le même environnement que celui des essais « SCSPT classique ». Pour varier les conditions de test et ainsi diversifier les résultats, nous avons choisi d'adopter un bâtiment différent, plus « énergivore » (SFH100), et de conserver le climat de Zurich et la surface de capteurs initiale pour le nouvel essai. Les données d'entraînement seront donc à la base légèrement différentes de celles habituellement utilisées. La régulation du système a été légèrement modifiée (paramètres de la loi de chauffe) pour que le système soit adapté aux besoins de chauffage.

Lors de cet essai, une erreur de paramétrage de la régulation a altéré le comportement du SSCb en début de séquence : le système coupait complètement le circuit de chauffage en période nocturne (les conséquences sont visibles sur la Figure 4-31). Cette erreur a été détectée et corrigée au troisième jour de la séquence.

La Figure 4-31 permet d'observer la qualité de régulation du SSCb sur T_{room} pour les 2 types d'essai différents (« Essai0 » et « Essai1 »).

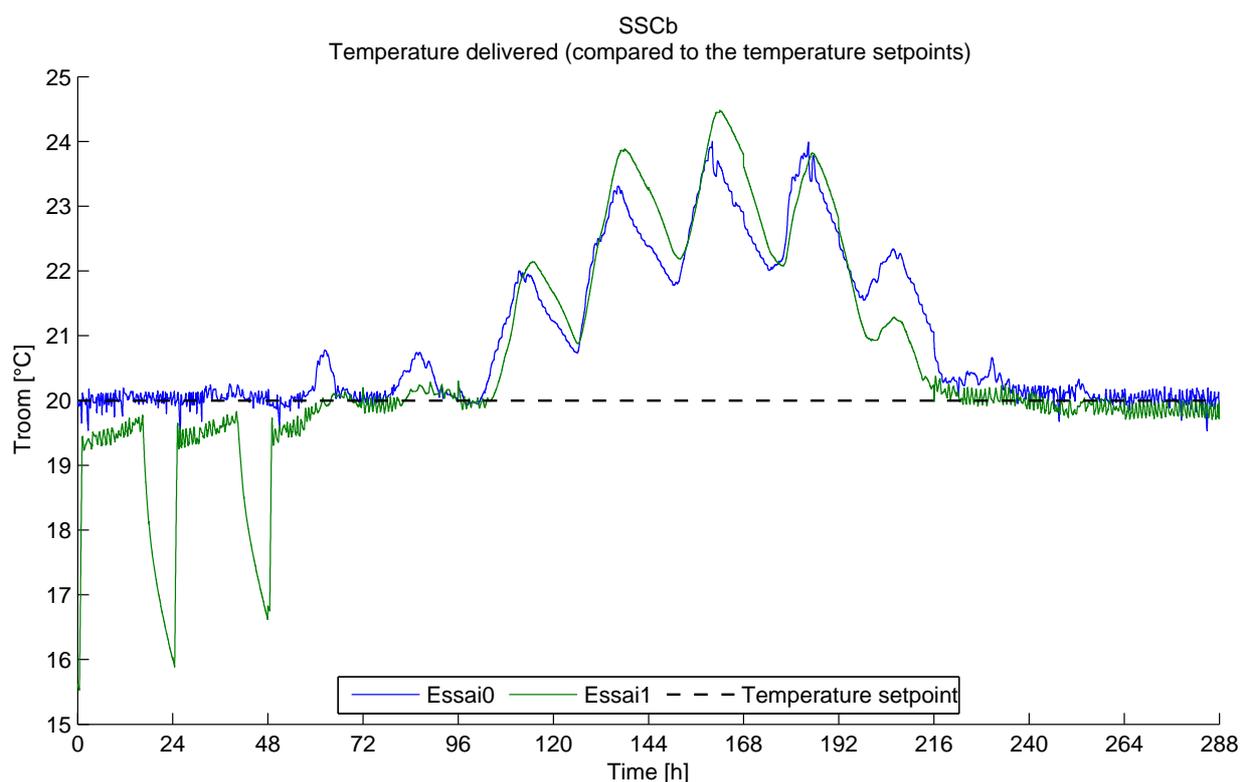


Figure 4-31 Température de l'air intérieur délivrée par le SSCb lors des tests « Essai0 » et « Essai1 », comparées à leur température de consigne respective

On constate qu'en période de chauffe « non perturbée » (c'est-à-dire en fin de séquence), la consigne de température sur T_{room} est bien respectée pour les deux essais. Le remontage du système et l'adaptation de la régulation au type de bâtiment plus énergivore n'ont pas provoqué de changement considérable dans la régulation du système pour les besoins de chauffage.

La régulation de la température de l'ECS T_{DHW} est semblable dans les deux cas également.

La Tableau 4-13 ci-dessous montre les énergies relevées pour l'environnement virtuel et pour le système réel lors de l'Essai1 du SSCb.

	Essai1			
	Q_{aux}	Q_{em}	Q_{coll}	Q_{dhw}
Energie calculée [kWh]	-	495	127	92
Energie mesurée [kWh]	599	559	124	91
Erreur [%]	-	-12,90	2,52	1,14

Tableau 4-13 Energies calculées au niveau de l'environnement virtuel et mesurées aux bornes du système lors de l'Essai1 du SSCb

La régulation inadaptée du système en début de séquence, a provoqué des relances très fortes pour ramener et maintenir par la suite, la température de l'air intérieur T_{room} à 20°C. Ces charges intenses et brusques du circuit de chauffage ont été assez difficiles à suivre par la régulation du module émulateur des radiateurs. Les

différences entre la température de sortie des radiateurs calculée pour l'environnement virtuel et celle réellement fournie au système est plus importante lors de cette période. Par conséquent, l'énergie réellement fournie par le système aux émetteurs de chaleur est aussi plus importante que celle considérée dans l'environnement virtuel. La consommation en énergie d'appoint semble particulièrement élevée également. Les performances du SSCb dans ces conditions sont donc évidemment faibles.

(b) Essais complémentaires

La disponibilité du banc d'essai semi-virtuel à la fin de ces travaux nous a permis de réaliser deux essais complémentaires. Les environnements considérés sont présentés dans le Tableau 4-14.

Nom de l'essai	Bâtiment	Climat	Surface de capteur
Essai2	SFH100	Zurich	16,1m ²
Essai3	SFH100	Stockholm	16.1m ²

Tableau 4-14 Environnements virtuels des essais « SCSPT modifiée » complémentaires du SSCb

Ces deux essais se sont déroulés sans aucun souci. Leurs résultats vont donc permettre d'évaluer la méthodologie dans des conditions souhaitées.

4.3.3. Traitement des données pour l'identification de modèles « Boîte Grise » du SSCb

L'erreur de programmation de régulation en début de séquence de l'essai original est loin d'être anodine et risque de perturber grandement l'apprentissage des modèles « Boîte Grise » du système, comme on peut le constater sur la Figure 4-32 présentant l'estimation des états du SSCb lors de cet essai.

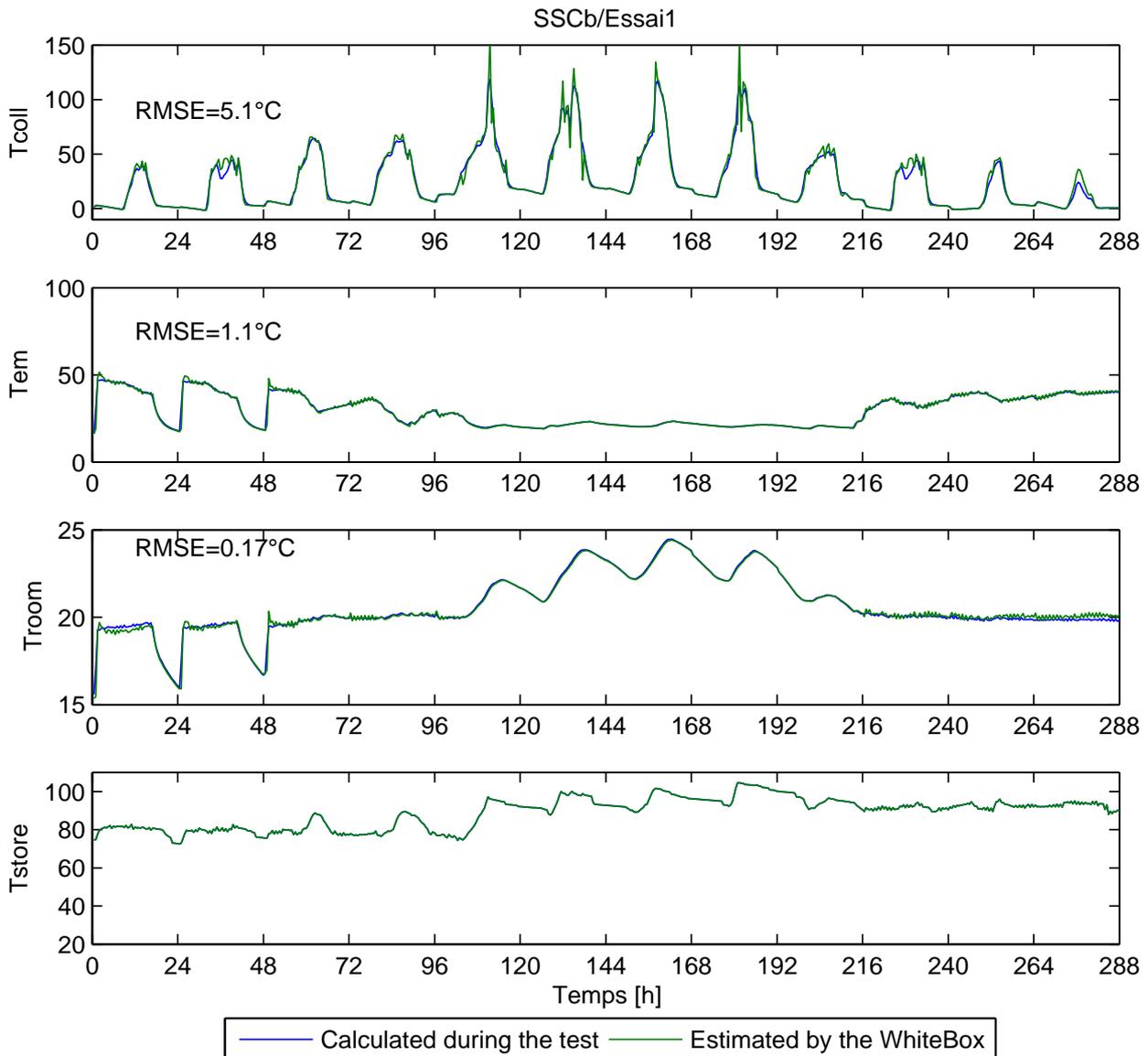


Figure 4-32 Comparaison des états du SSCb pendant la séquence d'entraînement « Essai1 » avec leur estimation par la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC

Comme pour le cas du SSCa (voir paragraphe 4.2.3), l'estimation des températures T_{coll} , T_{em} et T_{room} par la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC est très proche des températures calculées pour l'environnement virtuel lors de l'Essai1.

Comme précédemment, rien ne permet d'évaluer la qualité de l'estimation de T_{store} mais on peut douter que le ballon de stockage atteigne en moyenne des températures aussi élevées tout au long de la séquence. Les remarques faites sur l'estimation de cette température dans le cadre des essais du SSCa sont également valable dans ce cas (voir paragraphe 4.2.3) : même si elle n'est pas réaliste, l'estimation de T_{store} donne quand même des informations sur la gestion du stockage de l'énergie. Les résultats montrés ci-après concernent la méthodologie étudiée telle que présentée dans le CHAPITRE 2.

Le vecteur de régression pour l'Essai1 est représenté par la Figure 4-33.

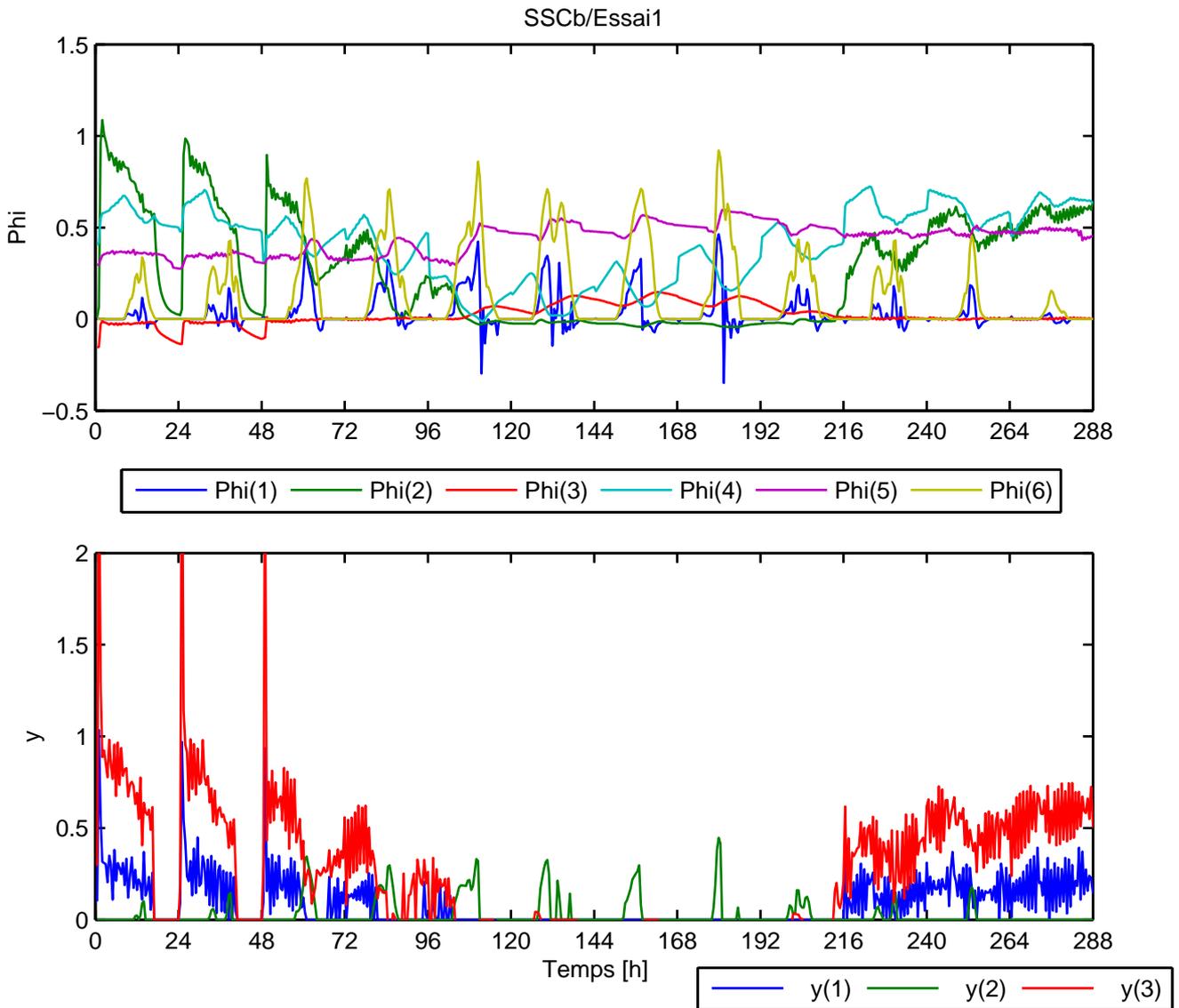


Figure 4-33 Evolution des vecteurs de régression entrées et sorties au cours de la séquence d'apprentissage issue de l'Essai1 du SSCb

Comme prévu, l'erreur de programmation de la régulation du circuit de chauffage en début de test entraîne de fortes variations sur certaines entrées et sorties de la séquence d'entraînement des réseaux de neurones, notamment sur le signal $y(3)$, inhérent à la puissance fournie aux émetteurs de chaleur \dot{Q}_{em} , et qui dépasse largement 1. Ces variations inappropriées devraient par conséquent avoir une influence importante sur l'apprentissage des modèles « Boîte Grise ».

Les données de l'Essai1 original semblent donc fortement faussées pour l'identification d'un modèle « Boîte Grise » correct. Elles nous permettront tout de même d'étudier l'influence d'erreurs expérimentales sur l'évaluation des performances du SSCb et d'envisager d'éventuelles solutions alternatives pour obtenir des résultats corrects. On pourra dans un premier temps tenter l'identification de modèles globaux du système à partir de la séquence entière. Si cette tentative ne

donne pas de résultats concluants, il sera toujours possible de réaliser le même protocole à partir de la même séquence amputée des deux premiers jours.

Les données issues des essais complémentaires ne présentent aucune anomalie. Il sera donc possible d'utiliser ces données pour évaluer la nouvelle méthodologie dans des conditions « idéales ».

Pour caractériser les performances du système testé, les modèles identifiés sont soumis à 27 simulations annuelles correspondant aux environnements énergétiques présentés dans le Tableau 4-15.

Bâtiment	Climat	Surface de capteur
SFH30	Barcelone	16
SFH60	Zurich	10,7
SFH100	Stockholm	6

Tableau 4-15 Environnements des séquences annuelles adoptées pour la caractérisation du SSCb

4.3.4. Résultats et caractérisation

4.3.4.1. A partir de l'Essai1 complet

La procédure d'entraînement des réseaux de neurones et de sélection d'un modèle « Boîte Grise » est appliquée 14 fois de suite à partir des données complètes de l'Essai1.

Les résultats de simulation de ce même Essai1 obtenus par la plupart de ces modèles identifiés donnent l'impression que ces derniers assimilent une gestion correcte de la température de l'air intérieur T_{room} , sans effet de la régulation nocturne (voir Figure 4-34).

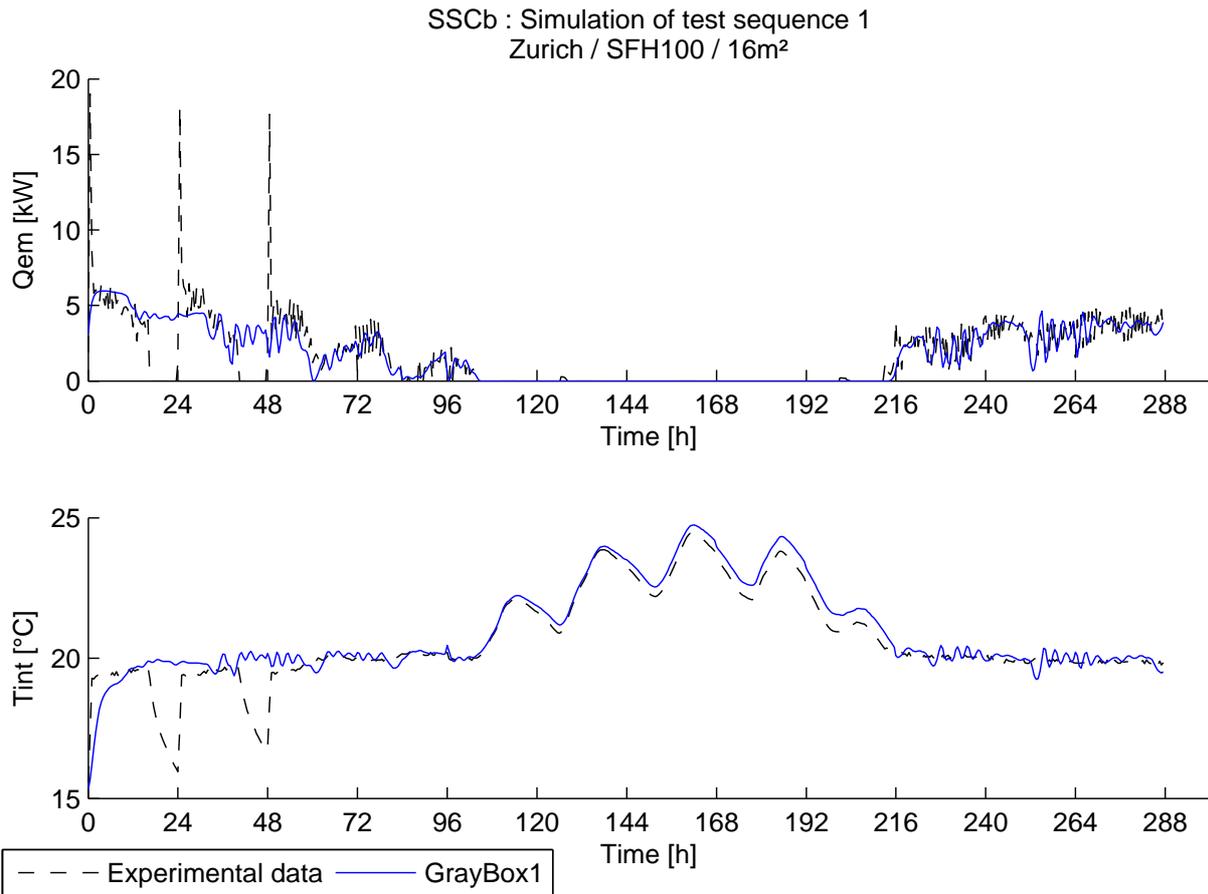


Figure 4-34 Température d'état du SSCa, estimées par le modèle "Boîte Grise" et mesurées lors de l'Essai2

Toutefois, les simulations annuelles font apparaître la défaillance de ces modèles. Pour l'ensemble des 14 modèles sélectionnés, la différence absolue moyenne MAE_{ref} obtenue à partir des 27 simulations annuelles est très élevée, allant environ de 2000kWh à plus de 57000kWh. Le modèle présentant le plus petit critère MAE_{ref} n'arrive même pas à estimer des énergies fournies aux émetteurs qui semblent correctes (voir Figure 4-35).

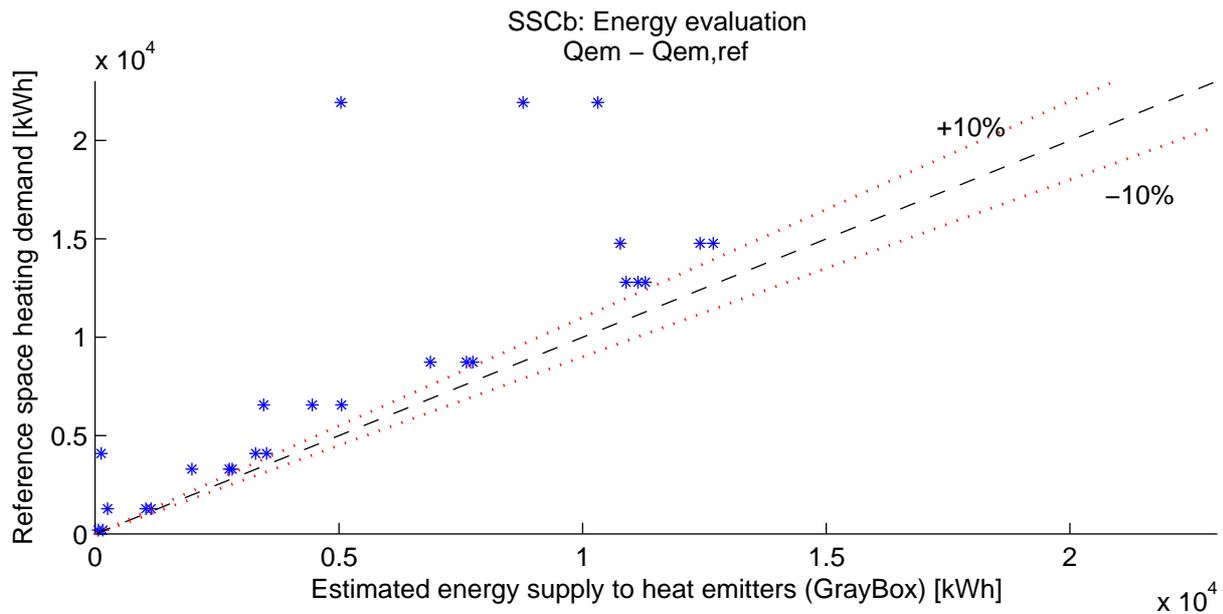


Figure 4-35 Comparaison entre l'estimation faite par un modèle « Boîte Grise » de l'énergie fournie aux émetteurs du SSCb et les besoins de chauffage de référence de l'environnement correspondant, pour les 27 simulations annuelles envisagées pour la caractérisation du système

La plupart des simulations montre d'importants problèmes d'évaluation des puissances aux bornes du SSCb, traduisant une estimation du comportement du système qui serait complètement aberrante (on peut voir par exemple sur la Figure 4-36 que les puissances sont largement sous-estimées en période de chauffe, amenant la température d'air intérieur T_{room} bien en dessous de sa consigne).

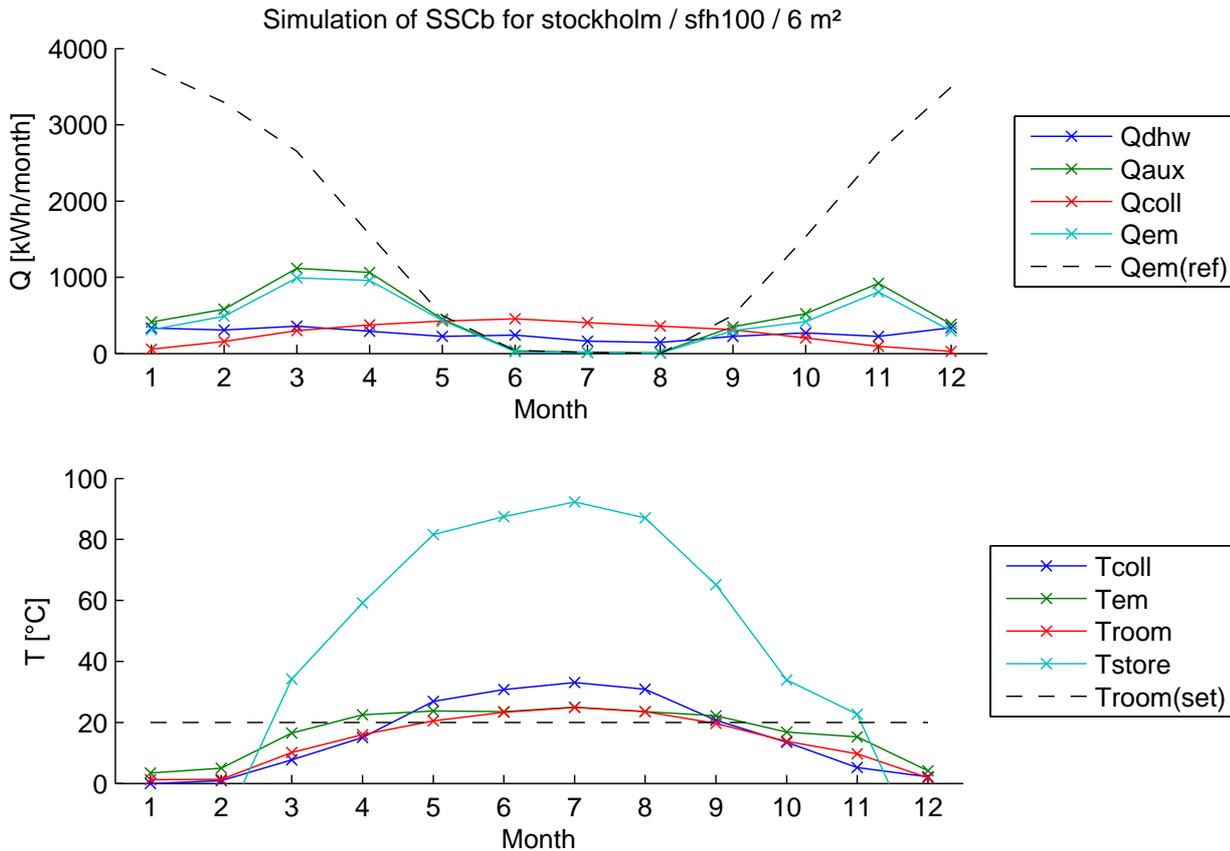


Figure 4-36 Estimation des énergies mensuelles et des températures moyennes mensuelles aux bornes du SSCb lors d'une des simulations annuelles de son comportement

Il ressort de cette étude expérimentale, qui a été perturbée en début de séquence, qu'aucune courbe caractéristique réaliste ne peut être établie.

On peut donc constater, grâce ces observations, que le comportement d'un SSC doit être cohérent pendant toute la séquence d'entraînement pour avoir une chance que les réseaux de neurones l'assimile correctement lors de la phase d'apprentissage.

Aussi allons-nous tenter de procéder à la même démarche mais avec une séquence d'entraînement tronquée des deux premiers jours pour ne garder que les données expérimentales qui traduisent un comportement du SSCb cohérent d'un bout à l'autre.

4.3.4.2. A partir de l'Essai1 raccourci

En écartant les deux premiers jours de la séquence d'entraînement, il faut noter tout d'abord que la complexité maximale du réseau de neurones à envisager sera plus réduite (voir la formule du nombre maximum raisonnable de neurones d'un réseau, paragraphe 2.3.3.1). En conséquence, les réseaux à entraîner dans le processus de sélection d'un modèle « Boîte Grise » seront limités à 4 neurones (contre 5 lorsque la séquence est complète) ce qui n'est peut être pas suffisant pour reproduire correctement le comportement du SSCb.

La procédure d'entraînement de réseaux de neurones et de sélection d'un modèle « Boîte Grise » est appliquée 26 fois de suite à partir des données de l'Essai1

raccourci. Parmi les 26 modèles ainsi sélectionnés, seule une petite moitié des modèles donnent des résultats qui ne paraissent pas aberrants (les résultats des autres modèles ressemblent à ceux présentés ci-dessus pour les modèles entraînés à partir de la séquence complète) et qui sont de plus assez similaires entre eux.

(a) Simulation de l'essai réalisé (en entier)

Pour commencer l'appréciation de la qualité de ces modèles, il est possible d'étudier les résultats obtenus par la simulation du SSCb lors de l'Essai1, dans son intégralité (voir Figure 4-37). Les modèles sont donc confrontés aux 2 premiers jours tronqués, qui n'ont pas été utilisés lors de leur entraînement.

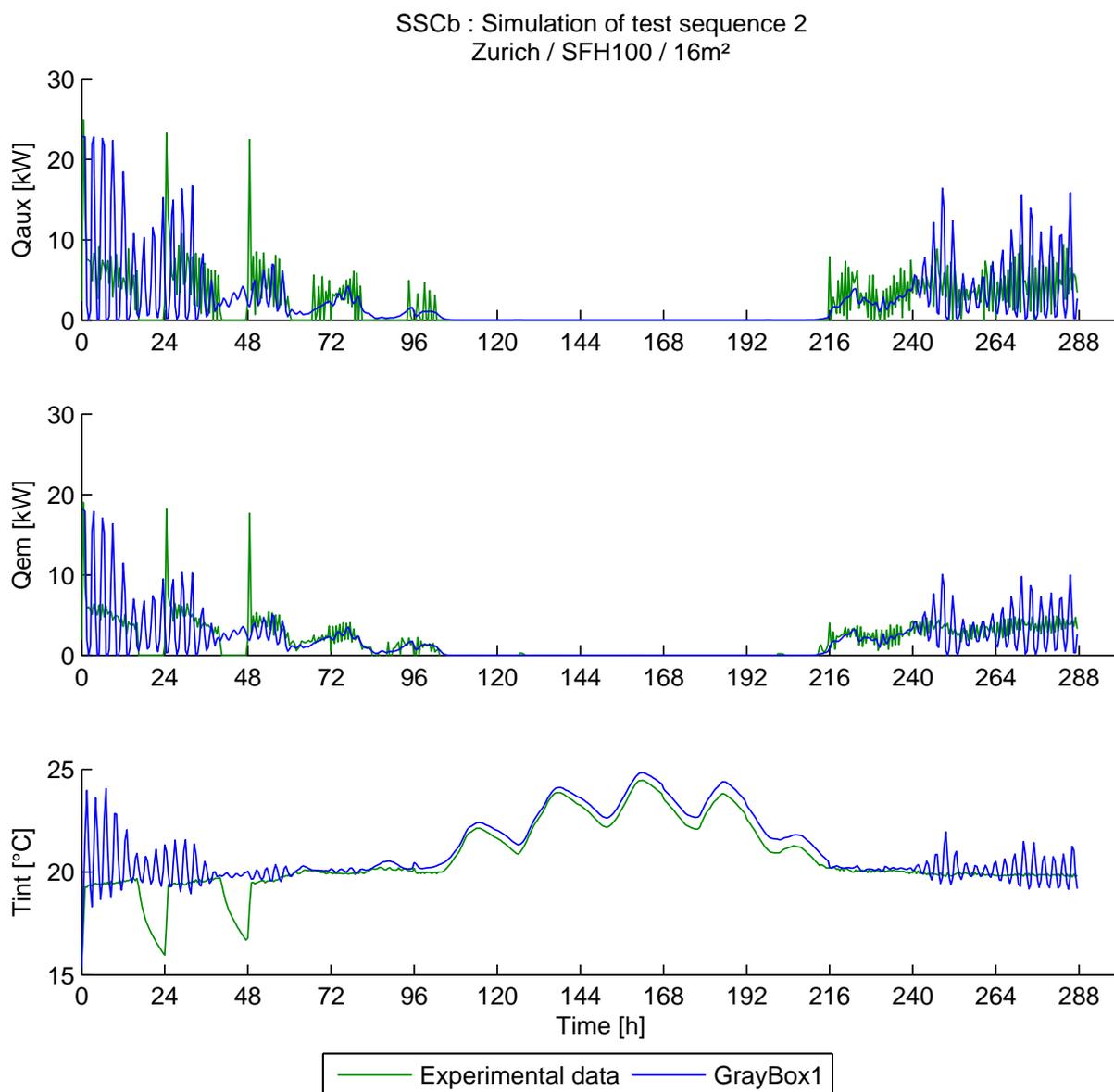


Figure 4-37 Puissance consommée par l'appoint, puissance fournie aux émetteurs et température de l'air intérieur, estimées par le modèle "Boîte Grise" et mesurées lors de l'Essai1 du SSCb

La figure ci-dessus montre clairement que les modèles sélectionnés ont quelques difficultés à simuler les périodes de chauffe, et notamment lors des deux premières journées, inédites pour les modèles. Pour cette période de la simulation, les modèles

gènèrent des oscillations assez importantes dans l'estimation de la puissance fournie aux émetteurs \dot{Q}_{em} et surtout la puissance consommée par l'appoint \dot{Q}_{aux} . Avec ces oscillations, non seulement le niveau moyen de \dot{Q}_{em} semble légèrement surestimé (en entraînant des oscillations de T_{int} globalement au dessus de sa consigne) mais la consommation estimée de la chaudière semble être encore plus amplifiée (les changements brusques du niveau de \dot{Q}_{aux} entraîne facilement des erreurs au niveau du modèle de chaudière d'appoint de la partie « Boîte Blanche », voir paragraphe 2.2.2.4).

Ces observations sont vérifiées en étudiant le bilan énergétique du SSCb lors de l'Essai1 et de sa simulation (voir Figure 4-38).

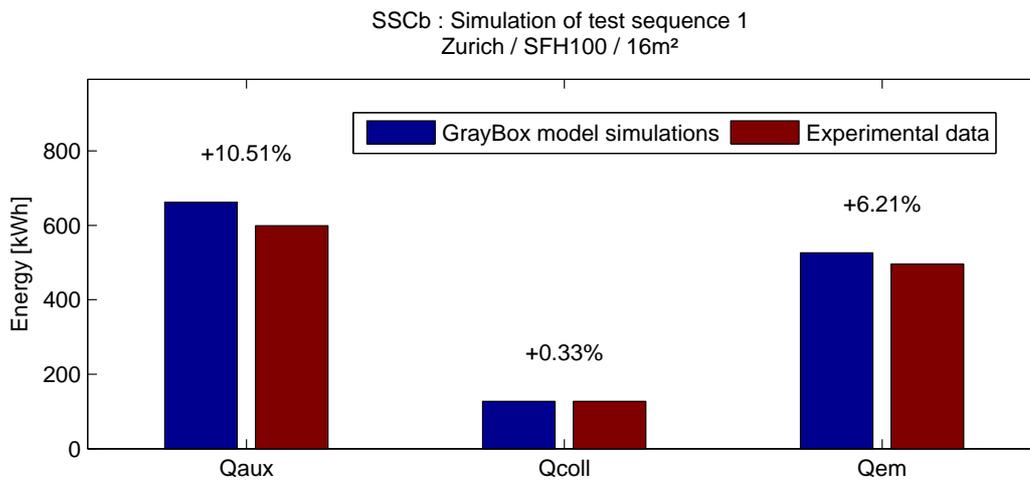


Figure 4-38 Estimation des bilans d'énergie lors de l'Essai1 du SSCb par un modèle "Boîte Grise" identifié à partir de l'Essai1 raccourci

Les modèles les plus corrects pour représenter le SSCb surestiment donc l'énergie consommée par la chaudière lors de l'Essai1.

(b) Caractérisation du SSCb

Les modèles sélectionnés ci-dessus ont été soumis aux environnements présentés dans le Tableau 4-15 pour des simulations annuelles. Les différences MAE_{ref} résultant de ces 27 simulations sont de l'ordre de 380kWh pour tous les modèles qui semblent donc assez corrects. Pourtant, on note sur la Figure 4-39 une certaine tendance à sous-estimer l'énergie fournie aux émetteurs Q_{em} par rapport aux besoins de chauffage de référence $Q_{sh,ref}$ (visible par les points généralement à gauche de la « bissectrice »).

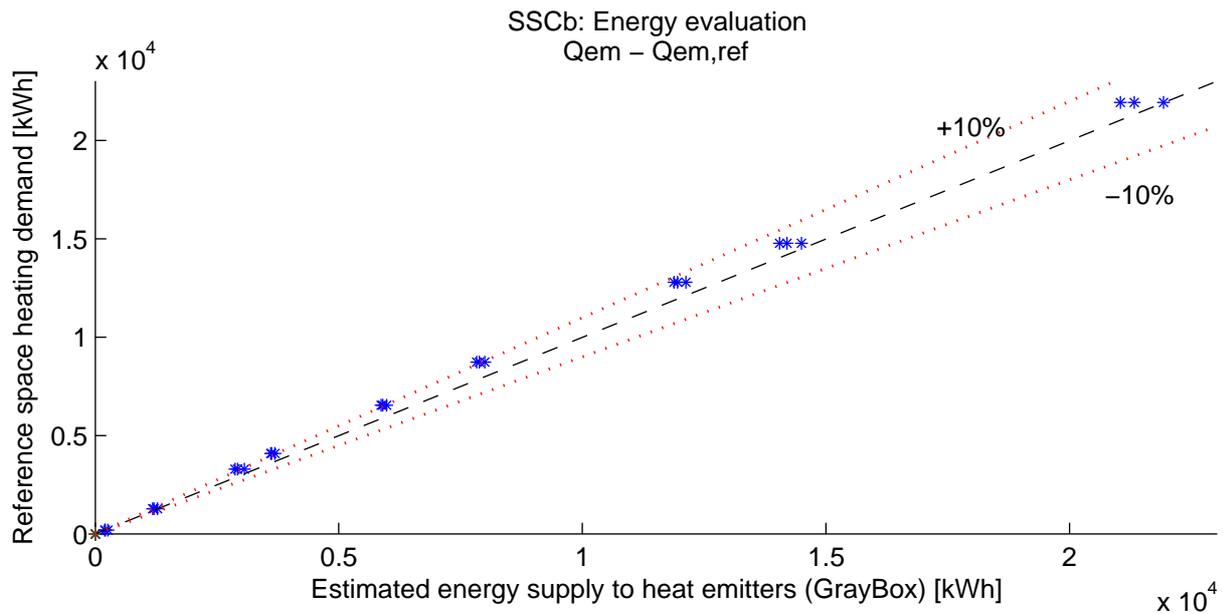


Figure 4-39 Comparaison entre l'estimation faite par un modèle « Boîte Grise » de l'énergie fournie aux émetteurs du SSCb et les besoins de chauffage de référence de l'environnement correspondant, pour les 27 simulations annuelles envisagées pour la caractérisation

Les écarts sont principalement dus à la gestion de \dot{Q}_{em} lors des périodes de chauffe, comme le montre un exemple présenté en Figure 4-40.

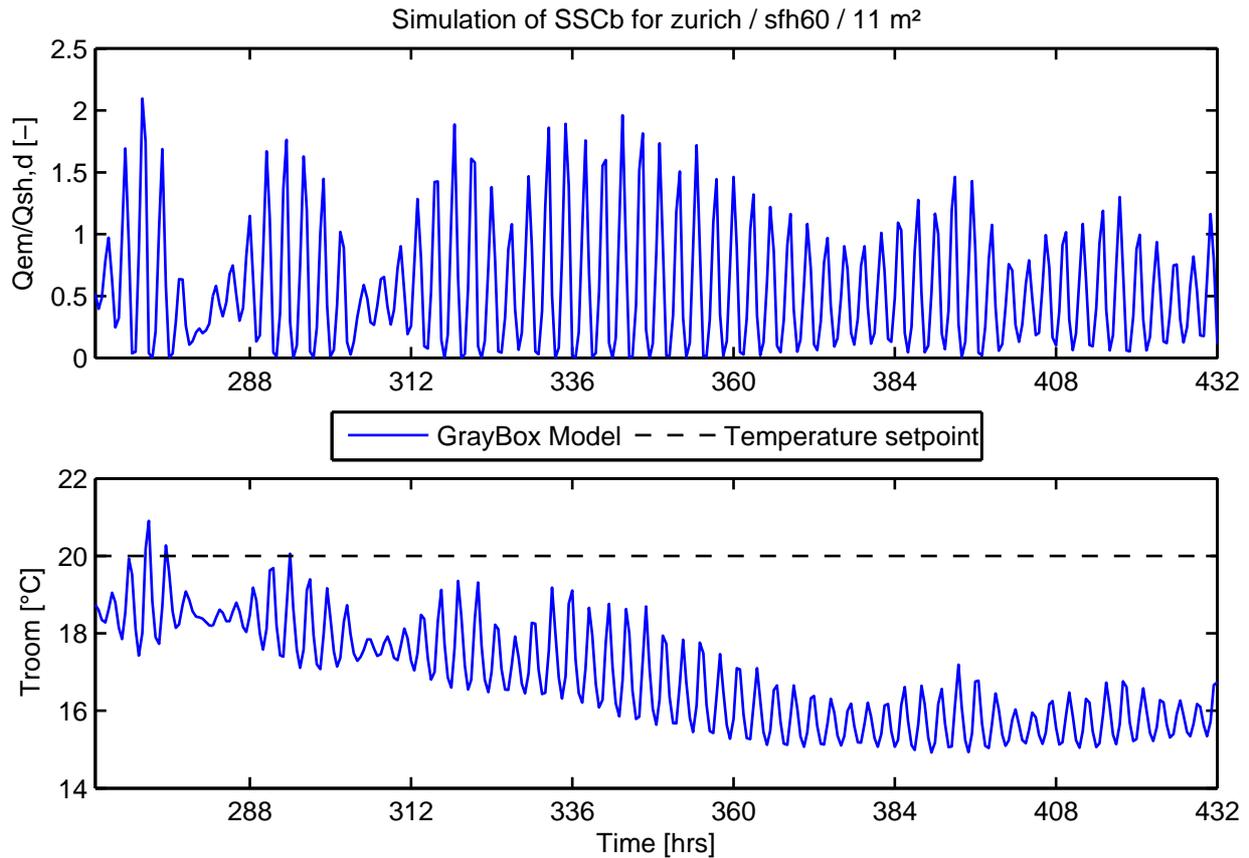


Figure 4-40 Extrait de la simulation annuelle du SSCb selon un de ses modèles entraînés à partir de l'Essai1 raccourci, pour le climat de Zurich, le bâtiment SFH60 et une surface de capteurs de 11m²

La semaine présentée sur la figure ci-dessus montre qu'en période de forts besoins de chauffage, le rapport entre l'énergie fournie aux émetteurs de chaleur \dot{Q}_{em} et la charge nominale de dimensionnement $\dot{Q}_{sh,d}$ (voir paragraphe 2.2.2.3) oscille énormément tout en ayant un niveau moyen aux alentours de 0,5. Or, pour cette période de chauffe simulée, ce rapport devrait être logiquement proche de 1. Les modèles sélectionnés n'arrivent donc pas à gérer correctement ce genre de période.

De plus, du fait de ces oscillations excessives, les consommations en énergie d'appoint semblent sur-estimées, ce qui confère au système testé une performance médiocre comme le montre la courbe caractéristique obtenue en appliquant la méthode FSC aux données issues des simulations annuelles (Figure 4-41).

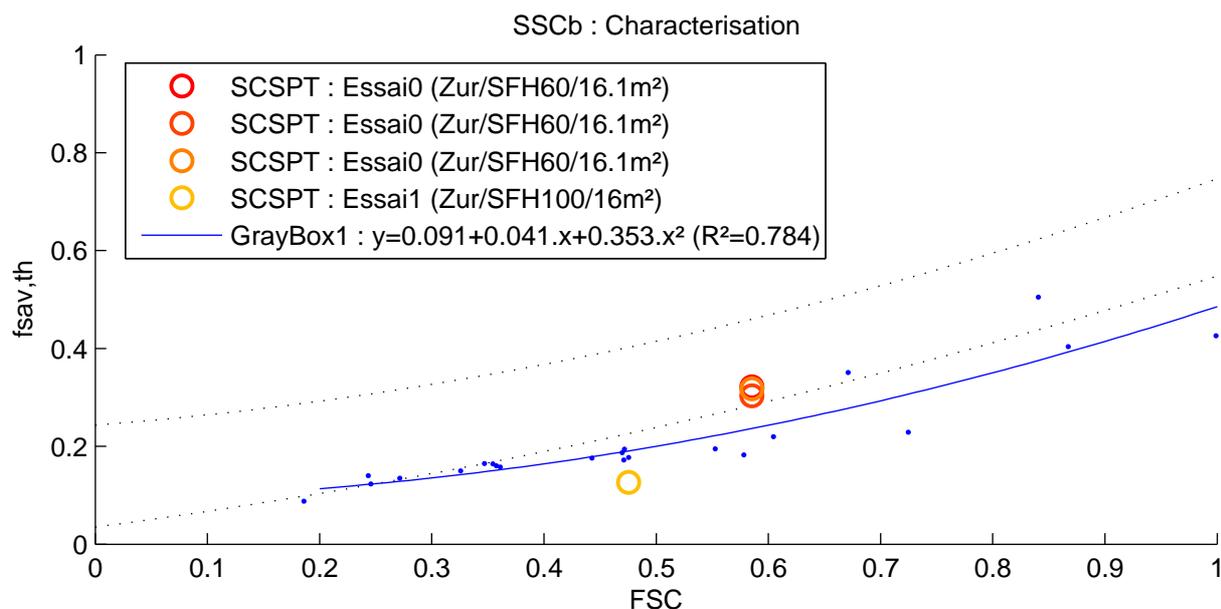


Figure 4-41 Caractérisation du SSCb selon les modèles "Boîte Grise" identifiées à partir de l'Essai1 raccourci

La courbe caractéristique obtenue pour le SSCb affiche une certaine tendance, mais qui ne correspond pas du tout aux performances mesurées lors des applications de l'Essai0 sur le banc d'essai semi-virtuel.

Cette étude d'entraînement de modèles « Boîte Grise » à partir d'une séquence faussée (représentée par le point Essai1 sur la figure ci-dessus) nous amène à faire les remarques suivantes :

- Des modèles entraînés à partir d'une séquence de test réduite, surtout par les journées où les besoins de chauffage sont les plus importants, peuvent conduire à des simulations faussées lorsqu'ils sont confrontés à certaines situations (température extérieure basse dans notre cas par exemple). Cela montre que les 12 jours actuels de test sont difficilement réductibles, du moins au niveau des premières et dernières journées de test ;
- Des signaux perturbés (par un mauvais réglage initial de la régulation du système dans notre cas), même sur une courte période, empêchent les modèles « Boîte Grise » entraînés de réaliser des simulations annuelles correctes

Finalement ces derniers résultats nous renseignent peu sur la validation expérimentale de la méthodologie proposée mais montrent que celle-ci nécessite certaines exigences lors de la mise en place et de la conduite d'essai, qu'il faudra prendre en compte lors d'études ultérieures.

4.3.4.3. A partir des essais complémentaires (Essai2 et Essai3)

A partir des deux essais complémentaires, représentant deux environnements énergétiques différents, il est possible d'entraîner plusieurs modèles « Boîtes Grises » du même SSCb. Le processus d'entraînement et de sélection (voir paragraphe 2.3) est lancé plusieurs fois successivement à partir de l'Essai2 et de l'Essai3. Les résultats de ces essais n'étaient disponibles qu'au terme de ces travaux de recherche, ne laissant pas suffisamment de temps pour identifier un grand nombre

CHAPITRE 4

de modèles différents, ni pour étudier dans les détails l'ensemble des modèles identifiés.

A l'instar de ceux identifiés pour le SSCa (paragraphe 4.2.4), les modèles entraînés dans le cadre de ces essais complémentaires ne caractérisent pas le SSCb exactement de la même manière. Cependant, une observation de l'ensemble des caractérisations ainsi obtenues suggère qu'un modèle semble plus régulièrement sélectionné pour chacun des essais. Ces deux modèles « privilégiés » permettent d'obtenir les courbes f_{sav}/FSC présentées sur la Figure 4-42 ci-dessous.

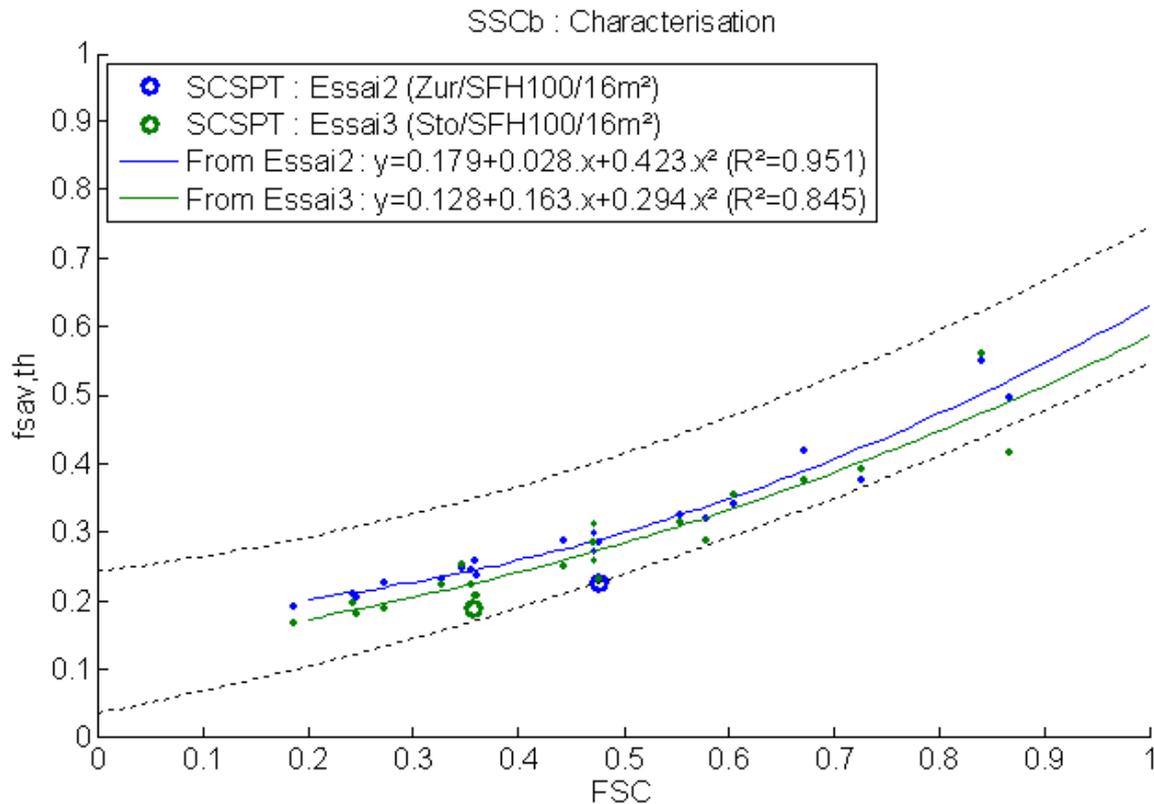


Figure 4-42 Caractérisation du SSCb selon des modèles "Boîte Grise" identifiées à partir de l'Essai2 et de l'Essai3

Il n'est toujours pas possible de valider les courbes obtenues ici. La méthode « SCSPT classique » semble estimer des performances annuelles un peu plus faibles, mais ces points ainsi placés restent tout de même dans la marge de dispersion de l'ensemble des points f_{sav}/FSC calculés.

Par contre, il est possible de constater que les résultats issus de modèles identifiés à partir de séquences d'entraînement distinctes sont proches. Les courbes caractéristiques sont donc assez semblables. Ces observations complètent donc l'analyse faite dans le cadre du SSCa concernant la cohérence des résultats obtenus pour un même système à partir de données différentes.

4.4. Conclusion du chapitre

Ce chapitre présente les premiers résultats obtenus à partir de données expérimentales issues de test de SSC réel. Le protocole d'essai des systèmes sur le banc d'essai thermique semi-virtuel et de traitement des données est d'abord exposé. Les modèles « Boîte Grise » identifiés pour deux SSC sont analysés et utilisés pour caractériser les systèmes testés.

Il ressort de cette étude les points principaux suivants :

- L'application réelle de la méthode SCSPT montre tout d'abord qu'il est difficile de réaliser correctement un test de 12 jours consécutifs sans encombre. Un défaut de fonctionnement du système (panne de circulateur,...) et/ou du banc d'essai (coupure d'électricité,...) peut très facilement se produire sur une durée aussi longue de test et invalider complètement les résultats attendus. De plus, le nombre important de paramètres à gérer avant toute réalisation d'un test SCSPT augmente fortement les chances d'avoir un essai erroné (mauvais réglage du système ou de l'environnement virtuel,...). Les résultats obtenus à partir d'un essai faussé sur le deuxième SSC montrent en effet que la réalisation d'un essai complet sans défaillances majeures est exigée pour pouvoir identifier des modèles « Boîte Grise » exploitables dans le but de caractériser le système testé. Les essais doivent donc être préparés avec un très grand soin.

- Le traitement des données expérimentales a montré que la modélisation de l'appoint et du ballon de stockage de la partie « Boîte Blanche » du modèle global de SSC est délicate. Cette observation avait déjà été faite dans le Chapitre 3 (voir paragraphe 3.3.3) mais elle est encore plus nette ici. Les contraintes imposées par le modèle « Boîte Grise » sur les variables disponibles ne permettent que l'emploi de modèles très sommaires (voir paragraphe 2.2.2) qui ne semblent pas pouvoir renseigner de manière précise sur la température moyenne du ballon de stockage réel. Ils donnent cependant une certaine information sur la gestion du stock d'énergie par le système testé qui peut être avantageusement interprétée par les réseaux de neurones. Pour cela, le traitement de cette information pourrait être plus judicieux que celle proposée actuellement dans la composition du vecteur de régression des entrées des réseaux de neurones. Par exemple, une comparaison de T_{store} avec sa valeur initiale estimée serait un meilleur repère, plus convenable pour le vecteur de régression que la température de consigne de l'ECS qui ne représente plus rien si la valeur précise de T_{store} n'est pas garantie. Une autre manière de s'affranchir de ce problème serait de considérer un modèle « Boîte Grise » qui n'utiliserait ni modèle de ballon de stockage et ni modèle de système d'appoint mais qui utiliserait à la place les sorties retardées des réseaux de neurones (ce point a déjà été développé dans le paragraphe 3.3.3). Ainsi la méthodologie s'affranchirait-elle d'une étape de mesures grossières de paramètres du ballon et de l'appoint, génératrice d'incertitude.

- Malgré les points évoqués ci-dessus, les résultats obtenus à partir de tests correctement réalisés pour les deux SSC testés sont encourageants. Les modèles « Boîte Grise » identifiés à partir de deux séquences de test différentes présentent les mêmes caractéristiques. L'approche proposée présente donc une bonne cohérence dans l'apprentissage du comportement du SSC étudié. Par contre, il n'est pas possible dans l'état actuel de la méthodologie d'obtenir une estimation unique de caractérisation du système. L'évaluation des performances peut être différente selon

CHAPITRE 4

le modèle sélectionné, surtout pour des environnements éloignés des conditions d'essais (généralement avec des taux *FSC* élevés). Aucun autre résultat que ceux obtenus par les différents essais ne permet de valider ou d'invalidier les courbes estimées.

CONCLUSION

CONCLUSION

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ouvrent des pistes pour l'élaboration d'une méthodologie complète de caractérisation des performances des Systèmes Solaires Combinés, systèmes utilisant l'énergie solaire pour couvrir une partie des besoins de chauffage et de production d'ECS d'un bâtiment.

Cette démarche répond au besoin d'obtenir et de diffuser des informations claires et fiables concernant les performances de cette gamme de système, afin d'améliorer leur développement. En effet, les SSC ont un potentiel d'économie d'énergie important mais leur utilisation est freinée par l'absence de test reconnu permettant d'évaluer leurs performances thermiques. Cette tâche est d'autant plus difficile qu'il existe une grande variété de SSC et que leurs performances sont très sensibles à leur conception et leur installation, ainsi qu'aux conditions énergétiques auxquelles ils sont confrontés (ressource en énergie solaire et qualité thermique du bâtiment).

Il existe à l'heure actuelle des pistes pour passer outre ces difficultés :

- La méthode FSC permet de représenter de manière très simple, à l'aide d'une simple courbe, le taux d'économie d'énergie que réaliserait un SSC en fonction de la ressource en énergie solaire et des besoins de chauffage du bâtiment. Ces courbes caractérisent donc les performances des systèmes pour toutes conditions énergétiques. Toutefois, elles ne sont construites aujourd'hui que par le biais de nombreuses simulations numériques de modèles théoriques de SSC. Il n'existe aucun moyen d'obtenir ces courbes à partir d'un test concret sur des SSC réels ;

- La méthode SCSPT, développée par le laboratoire LETH, propose d'estimer les performances annuelles de SSC à partir d'un essai spécifique en laboratoire. Par son approche « globale », elle permet de prendre en compte tous les aspects du système (conception, installation, régulation) dans l'évaluation de sa performance : cette méthode consiste à installer entièrement le système à tester sur un banc d'essai thermique semi-virtuel (c'est-à-dire qui permet de confronter un système thermique réel à un environnement virtuel, via des modules hydrauliques émulateurs) et de lui appliquer une séquence de test de 12 jours, caractéristique d'un climat et d'un type de bâtiment. A partir de la consommation d'énergie d'appoint du système enregistrée durant le test, une simple extrapolation permet d'évaluer sa performance annuelle, mais uniquement pour le climat et le bâtiment considéré lors de l'essai.

L'objectif de l'étude présentée ici est en quelque sorte de faire le lien entre la méthode SCSPT, qui présente des résultats fiables mais limités, et la méthode FSC, qui caractérise clairement les performances des SSC mais dont on ne sait pas obtenir les paramètres caractéristiques simplement. Une telle combinaison conférerait à la méthode SCSPT une reconnaissance par la communauté scientifique et industrielle qui lui permettrait d'être proposée comme référence normative.

Pour cela, l'approche que nous avons développée propose une extension de la procédure actuelle de la méthode SCSPT, basée sur l'analyse complète des variables aux bornes du système testé durant le test. Le but de cette analyse est d'identifier un modèle évolué et global du système testé qui soit suffisamment précis pour permettre d'évaluer sa consommation annuelle en énergie d'appoint pour différentes conditions énergétiques. Les résultats de ces simulations permettraient d'obtenir la courbe caractéristique du système testé à l'aide de la méthode FSC. Cette méthode exprime, par régression parabolique des résultats, le taux d'économie d'énergie procuré par un SSC en fonction de la fraction solarisable des

consommations, nombre indépendant du système et qui correspond à la limite théorique du taux d'économie d'énergie atteignable si l'ensemble du système avait une efficacité de 1.

Différentes techniques générales de modélisation de processus à partir de données expérimentales ont été étudiées. Compte tenu du fonctionnement des SSC et des contraintes expérimentales, une structure de modèle générique de SSC à identifier à partir d'un essai « 12 jours » est proposée. Elle est composée d'une partie « Boîte Blanche » linéaire dynamique et d'une partie « Boîte Noire » non-linéaire statique, formant ainsi un modèle global appelé « Boîte Grise » :

- La partie « Boîte Blanche » évalue de manière dynamique l'état du système c'est-à-dire les niveaux de températures de chacun de ses éléments (capteurs solaires, émetteurs de chaleur, bâtiment, stockage de la chaleur et système d'appoint). Les contraintes expérimentales et les techniques d'apprentissage envisagées pour la partie « Boîte Noire » rendent nécessaire l'adoption de « sous-modèles » simples pour constituer cette partie. Les équations qui ont été retenues sont fortement inspirées de textes normatifs s'appliquant aux principaux éléments des SSC ;

- La partie « Boîte Noire » retranscrit le comportement propre du SSC testé, c'est à dire la gestion des flux énergétiques en son sein, en fonction de variables extérieures et de son propre état (évalué à partir de la « Boîte Blanche »). En raison de leur capacité à apprendre des phénomènes non linéaires et de leur popularité grandissante, y compris dans le domaine des énergies renouvelables, les réseaux de neurones ont été choisis pour constituer cette partie. Ils « apprennent » le comportement caractéristique du SSC testé à partir d'une base de données fournie par un test de type SCSPT sur le banc d'essai semi-virtuel.

Une procédure complète est proposée pour entraîner de multiples réseaux neuronaux et sélectionner celui qui semble le plus apte à constituer un modèle « Boîte Grise ». Celui-ci doit permettre de simuler un comportement qui soit le plus fidèle possible au comportement étudié lors de l'essai « 12 jours » du SSC testé. Cette étape d'identification est ajoutée au protocole initial de la méthode SCSPT, moyennant l'adaptation de l'environnement virtuel aux équations de la partie « Boîte Blanche » lors du test de SSC.

Une expérimentation numérique a tout d'abord permis de montrer la pertinence de l'approche proposée en rapprochant les résultats issus de simulations de modèles numériques détaillés de 3 SSC avec le logiciel TRNSYS, à ceux obtenus par l'application de la méthodologie proposée sur ces 3 systèmes. Pour cela, les modèles détaillés ont été soumis à la simulation de la séquence de test SCSPT. Leurs résultats ont permis de définir des modèles « Boîte Grise » correspondants à chacun des systèmes. Les modèles « Boîte Grise » et les modèles détaillés, soumis à 27 simulations annuelles d'environnements énergétiques différents, présentent des résultats très similaires. Ce qui suggère qu'il est effectivement possible de déterminer à partir de la séquence de test « 12 jours » un modèle « Boîte Grise » suffisamment précis du SSC testé pour caractériser ses performances.

Ensuite, une expérimentation réelle sur deux SSC a été réalisée. La mise en œuvre des manipulations a fait ressortir quelques difficultés quant à l'application de la

CONCLUSION

méthode envisagée, notamment sur l'estimation de la température moyenne du ballon de stockage durant l'essai. Malgré cela, les résultats obtenus pour les deux systèmes testés sont très encourageants. Ils montrent une très bonne cohérence de la démarche envisagée mais il manque des données supplémentaires pour valider complètement les courbes caractéristiques estimées. Un premier essai réalisé sur le deuxième SSC a subi des perturbations trop importantes, qui ont rendu obsolète la base de données d'entraînement de ce système. Cet essai montre les difficultés à réaliser correctement une séquence de test de 12 jours consécutifs sans encombre, compte tenu de la complexité des systèmes et du banc d'essai, ainsi que du nombre de paramètres à maîtriser. Les essais doivent donc être préparés avec une très grande rigueur afin d'obtenir une base de données fiable pour l'identification d'un modèle « Boîte Grise » convenable des SSC testés.

Globalement, l'ensemble de ces travaux montre que l'approche par modélisation neuronale étudiée pour évaluer les performances d'un SSC testé selon la méthode SCSPT est pertinente. Il en ressort également quelques pistes qui pourraient permettre d'améliorer encore la démarche. Ces pistes concernent surtout certains aspects de la structure du modèle « Boîte Grise » et la procédure d'entraînement des réseaux de neurones et de sélection d'un modèle final.

- L'utilisation de modèles simplifiés dans la partie « Boîte Blanche » entraîne quelques erreurs d'estimations de températures, notamment au niveau du ballon et de la chaudière d'appoint. Il semble que la partie « Boîte Noire » (réseau de neurones) soit capable de prendre en charge ces erreurs et de fournir quand même des estimations d'énergies convenables. Cependant, il est envisageable de réorganiser le modèle global pour atténuer ce problème et améliorer les informations fournies par la partie « Boîte Blanche » :

- En proposant d'autres « sous-modèles » plus précis et/ou plus complets pour représenter le ballon de stockage et l'appoint du SSC. Les équations utilisées actuellement pour ces deux éléments ne semblent pas capables de reproduire leurs comportements réels. Des informations sur la qualité de l'énergie stockée (stratification de la température dans le ballon) pourraient sûrement améliorer la modélisation du comportement du système testé. Il serait donc intéressant d'envisager un modèle multi-nodal du ballon de stockage ou d'appliquer à celui-ci une analyse « exergétique²¹ ». Cependant, étant donné le peu de variables disponibles au sein du modèle « Boîte Grise », l'obtention de tels modèles semble encore difficilement envisageable.
- En étudiant plus en détail les défauts de ces « sous-modèles » et en prenant ceux-ci en compte pour traiter leurs informations de manière plus judicieuse (notamment en proposant un vecteur de régression des entrées qui comparerait la température moyenne du ballon de stockage avec sa température initiale) ;
- En considérant un modèle « Boîte Grise » qui n'utiliserait ni modèle de ballon de stockage, ni modèle de système d'appoint mais qui utiliserait à la place les sorties retardées des réseaux de neurones

²¹ L'exergie est une grandeur permettant de calculer le travail maximal que peut fournir un système à l'extérieur lorsqu'il se met à l'équilibre thermodynamique avec son environnement. Elle permet ainsi de traduire la qualité d'une énergie.

(utilisation d'un réseau bouclé dans la partie « Boîte Noire »). Il n'y aurait plus besoin dans ce cas de mesures de paramètres du ballon et de l'appoint (sûrement trop incertaines actuellement). Le test complet serait donc entièrement « non-intrusif ».

- Il apparaît difficile à partir du protocole actuel d'entraînement de réseaux de neurones de définir un modèle « Boîte Grise » unique du SSC testé. Il faudrait donc pour estimer de manière unique la caractérisation de ses performances :
 - Soit déterminer une étape différente de sélection de modèle, plus performante, que celle utilisée actuellement, basée sur la simulation de la séquence d'entraînement ;
 - Soit ne pas discriminer les modèles obtenus par les multiples entraînements mais plutôt chercher à traiter l'ensemble des informations fournies par tous les réseaux entraînés.
- Les séquences actuelles des tests appliqués aux SSC semblent appropriées pour l'apprentissage de modèles « Boîte Grise » convenables. Nous avons vu qu'il était important que la séquence sollicite le plus possible les variables aux bornes du système pour intégrer toutes ses fonctionnalités et son comportement complet dans les données issues du test. Il serait donc envisageable d'étudier une séquence différente, allant encore plus dans ce sens et qui optimiserait encore mieux les données enregistrées pour tous les SSC.

Pour pouvoir rendre la démarche complète, il reste encore quelques aspects à envisager et compléter :

- L'architecture du modèle « Boîte Grise » envisagée confère à celui-ci un aspect modulable. Ainsi sera-t-il possible d'adapter assez aisément la partie « Boîte Blanche » à d'autres éléments des SSC. Pour l'instant, seuls les émetteurs de type « radiateur à eau chaude », les stockages hydrauliques et les appoints de type « chaudière à combustion gaz » ont été abordés. Pour adapter la démarche à toutes les familles de SSC, la partie « Boîte Blanche » devra être au moins complétée par la modélisation de planchers chauffants de type « Planchers Solaires Directs » et par celle d'autres systèmes d'appoint. On peut également remarquer qu'à partir de cette architecture de modèle, la démarche pourrait être adaptée à d'autres systèmes énergétiques que les SSC.
- Pour faciliter cette première étude de modélisation générique de SSC à partir de données expérimentales, l'aspect puisage ECS a été simplifié en considérant dans un premier temps que les SSC fournissaient cette eau à la température souhaitée. Pour que la méthodologie soit plus juste, il faudrait prendre en compte la gestion de cette consigne par le système dans l'apprentissage de son comportement. L'hypothèse relative à la température d'ECS devra donc être revue de manière plus réaliste en considérant par un moyen adéquat, celle fournie par le système comme sortie de la partie « Boîte Noire ».
- Le modèle « Boîte Grise » actuel ne traite que des énergies thermiques aux bornes des SSC testés. Pour obtenir une analyse complète de leurs performances, il faudrait pouvoir également évaluer l'énergie électrique auxiliaire utilisée pour faire fonctionner le système (par exemple comme sortie complémentaire de la partie « Boîte Noire »).

CONCLUSION

Ces pistes permettront d'avoir une méthodologie complète et fiable de caractérisation des SSC. Une fois validée complètement (par exemple par le biais de nombreux essais de différents systèmes et de comparaisons avec des données in-situ), cette méthodologie pourrait sûrement être envisagée comme référence normative. Elle permettrait d'envisager sérieusement par exemple la certification et l'étiquetage énergétique des SSC, la prise en compte plus rigoureuse de leurs performances dans la réglementation thermique et la généralisation de Garanties de Résultats Solaires²². Les utilisateurs potentiels auraient donc un large panel d'outils pour pouvoir comparer et choisir les systèmes en toute confiance.

²² La Garantie de Résultats Solaires (GRS) se traduit par un engagement des opérateurs techniques à ce que le système installé fournisse un niveau minimal d'énergie thermique d'origine solaire.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[Albaric et al., 2008]

Albaric, M., Nowag, J., Papillon, P., 2008

Thermal performance evaluation of solar combisystems using a global approach
Eurosun 2008, Lisbon, Portugal

[Albaric et al., 2009]

Albaric, M., Riederer, P., Boddaert, S., 2009

Projet EvaluationSSC : Méthode d'évaluation de Systèmes Solaires Combinés, Rapport final n°2, Phase 3/4 - Amélioration de la méthode et comparaisons inter-laboratoire [Confidentiel, pour l'ADEME]

[Albaric et al., 2010]

Albaric, M., Mette, B., Ullman, J., Drück, H., Papillon, P., 2010

Comparison of two different methods for solar combisystems performance testing
Eurosun 2010, Graz, Autriche

[ASHRAE 93-86, 1986]

ANSI/ASHRAE 93-86, 1986

Method for testing to determine the thermal performance of solar collectors
ASHRAE Inc., New York

[Baccoli et al., 2010]

Bacoli, R., Carlini, U., Mariotti, S., Innamorati, R., Solinas, E., Mura, P., 2010

Graybox and adaptive dynamic neural network identification models to infer the steady state efficiency of solar thermal collectors starting from the transient condition
Solar Energy, 84, pp.1027-1046

[Bales, 2002]

Bales, C., 2002

Combiteest - Initial development of the AC/DC test method. Technical report. IEA Solar Heating & Cooling programme Task26
Site internet : <http://www.iea-shc.org/task26/> (accès le 4/7/2011)

[Barron, 1993]

Barron, A.R., 1993

Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function,
IEEE Transactions on Information Theory, 39, pp.930-945

[Batiti, 1992]

Batiti, R., 1992

First and second order methods for learning: between steepest descent and Newton's method
Neural computation, 4, pp.141-166

[Bryn et Schiefloe, 1996]

Bryn, I., Schiefloe, P.A., 1996

Atrium models for the analysis of thermal comfort and energy use. A report of Task12 building energy analysis and design tools for solar applications

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task12/> (accès le 7/18/2011)

[Certita, 2010]

Certita, organisme mandaté par AFNOR Certification, 2010

Règles de certification. Marque NF-Chauffe Eau Solaires individuels. N°identification : NF 441

[Cybenko, 1989]

Cybenko, G., 1989

Approximation by superpositions of a sigmoidal function.

Mathematics of Control, Signals and Systems, 2, pp.303-314

[Dennis et Schnabel, 1983]

Dennis, J.E., Schnabel, R.B., 1983

Numerical methods for unconstrained optimization and non-linear equations

Ed. Prentice-Hall Int., Englewood Cliffs, NJ, 394 pages

[Dreyfus et al., 2002]

Dreyfus, G., Martinez, J-M, Samuelides, M., Gordon, M.B., Badran, F., Thiria, S., Hérault, L., 2002

Réseaux de neurones, méthodologie et applications, 2e édition

Ed. Eyrolles, Paris, 424 pages

[Drück et Bachmann, 2002]

Drück, H., Bachmann, S., 2002

Performance testing of solar combisystems, Comparison of the CTSS with the ACDC procedure. Technical report. IEA Solar Heating & Coolong programme Task 26.

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task26/> (accès le 4/7/2011)

[Drück, 2006]

Drück, H., 2006

Multiport store - Model for TRNSYS - Type 340. Version 1.99F

Institut für Thermodynamik und Wärmetchnik (ITW), Universität Stuttgart

[Duffie et Beckman, 2006]

Duffie, J., A., Beckman, W., A., 2006

Solar engineering of thermal process. Third edition

Ed. John Wiler & Sons, Hoboken, New Jersey, 928 pages

[EN12975-2, 2006]

European standard EN 12975-2, 2006

Thermal solar systems and components - Solar collectors - Part 2 : Test methods

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

BIBLIOGRAPHIE

[EN12976-2, 2006]

European standard EN 12976-2, 2006

Thermal solar systems and components - Factory made systems - Part 2 : Test methods

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[CEN/TS12977-1, 2010]

European standard CEN/TS 12977-1, 2001

Thermal solar systems and components - Custom built systems - Part 1 : general requirements for solar water heaters and combisystems

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[CEN/TS12977-2, 2010]

European standard CEN/TS 12977-2, 2001

Thermal solar systems and components - Custom built systems - Part 2 : Test methods for solar water heaters and combisystems

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[EN12977-3, 2008]

European standard EN 12977-3, 2008

Thermal solar systems and components - Custom built systems - Part 3 : Performance test methods for solar water heater stores

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[CEN/TS12977-4, 2010]

European standard CEN/TS 12977-4, 2001

Thermal solar systems and components - Custom built systems - Part 4 : Performance test methods for solar combistores

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[CEN/TS12977-5, 2010]

European standard CEN/TS 12977-5, 2001

Thermal solar systems and components - Custom built systems - Part 5 : Performance test methods for control equipment

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[EN15316-4-3, 2007]

European standard EN 15316-4-3, 2007

Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirement and system efficiencies - Part 4-3: Heat generation systems, thermal solar systems

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[EN442-2, 1996]

European standard EN 442-2, 1996

Radiators and convectors. Part 2 : Test methods and ratings.

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[EN677, 1998]

European standard EN 677, 1998

Gas-fired central heating boilers - Specific requirements for condensing boilers with a nominal heat input not exceeding 70kW

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[ESTIF, 2010]

European Solar Thermal Industry Federation, 2010

Solar thermal markets in Europe, Trends and market statistics 2009

Site internet : <http://www.estif.org/> (accès le 3/31/2011)

[ESTTP, 2010]

European Solar Thermal Technology Platform, 2010

Solar Heating and Cooling for a sustainable energy future in Europe. Sixth framework programme. Revised Version

Site internet : http://esttp.org/cms/front_content.php (accès le 3/31/2011)

[Fiedler et Knirsch, 1998]

Fiedler, T., Knirsch, A., 1996

Add-on to the hitherto existing gas fuelled boiler-model for a wood-fired boiler with calorific value usage

Transsolar, Stuttgart

[Godfrey, 1993]

Godfery, K.R., 1993

Perturbation signals for system identification

Ed. Prentice-Hall Int., , 400 pages

[Grenelle, 2009]

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2009

Le Journal du ministère. Le Grenelle Environnement : la première loi du Grenelle

Site internet : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=22682> (accès le 3/31/2011)

[Hadorn et al., 2005]

Hadorn, J.C. et al., 2005

Thermal energy storage for solar and low energy building, state of the art. By the IEA Solar Heating and Cooling Task 32

Ed. Cargraphics, 170 pages

[Heimrath, 2004]

Heimrath, R., 2004

Simulation, optimierung und vergleich solarthermischer anlagen zur raumwärmeversorgung für mehrfamilienhäuser

Dissertation am Institut für Wärmetechnik IWT det TU Graz, Graz

BIBLIOGRAPHIE

[Heimrath et Haller, 2007]

Heimrath, R., Haller, M., 2007

Project Report A2 of Subtask A: The reference heating system, the template solar system. A report of IEA SHC - Task 32

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task32/> (accès le 3/31/2011)

[Holst, 1996]

Holst, S., 1996

TRNSYS - Models for radiator heating systems

Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. Abteilung 4 :

Thermische Nutzung von Sonnenenergie, München

[ISO13786, 2007]

European standard EN ISO 13786, 2007

Thermal performance of building components - Dynamical thermal characteristics - Calculation methods

Comité Européen de Normalisation, Bruxelles

[ISO13790, 2008]

International Standard ISO 13790, 2008

Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling

[ISO9459-2, 1995]

International Standard ISO 9459-2, 1995

Solar Heating. Domestic hot water. Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems

[ISO9459-5, 2007]

International Standard ISO 9459-5, 2007

Solar Heating. Domestic hot water. Part 5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation

[ISO9488, 1999]

International Standard ISO 9488, 2007

Solar Energy - Vocabulary

[ISO9806-1, 1994]

International Standard ISO 9806-1, 1994

Test methods for solar collectors. Part 1 : Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop

[ISO9806-3, 1995]

International Standard ISO 9806-3, 1995

Test methods for solar collectors. Part 3 : Thermal performance of unglazed liquid heating collectors (sensible heat transfer only) including pressure drop

[Jordan et Vajen, 2001]

Jordan, U., Vajen, K., 2001

Realistic domestic hot water profiles in different time scales

Universität Marburg

Site internet : <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/library15.htm#IEA26Load> (accès le 4/11/2011)

[Kalogirou et Panteliou, 2000]

Kalogirou, S.A., Panteliou, S., 2000

Thermosiphon solar domestic water heating systems : long-term performance prediction using artificial neural networks

Solar Energy, 2, pp.163-174

[Kalogirou, 2001]

Kalogirou, S.A., 2001

Artificial neural networks in renewable energy systems applications : a review

Renewable and sustainable energy reviews, 5, pp.373-401

[Klein, 1994]

Klein, S.A. et al., 1994

TRNSYS, a transient simulation program.

Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin

[Letz, 2002]

Letz, T., 2002

Validation and background information on the FSC procedure. A report of IEA SHC - Task 26

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task26/> (accès le 3/31/2011)

[Letz, 2006]

Letz, T., 2006

Etude qualitative et quantitative du fonctionnement de systèmes solaires combinés en usage réel, Synthèse du programme de suivi sur sites.

Site internet :

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=40819&p1=02&p2=08&ref=17597> (accès le 3/31/2011)

[Letz et al., 2009]

Letz, T., Bales, C., Perers, B., 2009

A new concept for combisystems characterization: The FSC method

Solar Energy, 83, pp.1540-1549

[Letz, 2010]

Letz, T., 2010

Combisol project. Solar combisystem promotion and standardisation. D4.2 : Guidelines for calculation of savings indicators

Site internet : <http://www.combisol.eu/> (accès le 6/15/2011)

BIBLIOGRAPHIE

[Letz et al., 2010]

Letz, T., Cholin, X., Pradier, G., 2010

Combisol project, Solar combisystems promotion and standardisation. D4.4: Comparison of results of all monitored plants.

[Ljung, 2010]

Ljung, L., 2010

Perspectives on system identification
Annual reviews in control, 34, pp.1-12

[Lucea, 2006]

Lucea, M., 2006

Modélisation dynamique par réseaux de neurones et machines à vecteurs supports : contribution à la maîtrise des émissions polluantes de véhicules automobiles
Thèse de doctorat de l'université Paris 6

[Mackay, 1992]

Mackay, D.J.C., 1992

A practical Bayesian framework for backpropagation networks
Neural computation, 4, pp.448-472

[Marquardt, 1963]

Marquardt, D.W., 1963

An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters
Journal of the society of industrial and applied mathematics, 11, pp.431-441

[MATLAB, 2008a]

Mathworks, 2008

MATLAB 7.6.0 (2008a) : Documentation générale
Site internet : <http://www.mathworks.fr> (accès le 5/23/2011)

[MATLAB, 2008b]

Mathworks, 2008

MATLAB 7.6.0 (2008a) : Documentation sur la Neural Network Toolbox
Site internet : <http://www.mathworks.fr> (accès le 5/23/2011)

[Medinelli Sanino et Rojas Reischel, 2007]

Medinelli Sanino, L.A., Rojas Reischel, R.A., 2007

Modeling and identification of solar energy water heating system incorporating nonlinearities
Solar Energy, 81, pp.570-580

[Mellit et Massi Pavan, 2010]

Mellit, A., Massi Pavan, A., 2010

A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy
Solar Energy, 84, pp.207-821

[Mette et al., 2010]

Mette, B., Ullman, J., Drück, H., Albaric, M., Leconte, A., Papillon, P., 2010
*Combisol project. Solar combisystem promotion and standardisation. D3.1:
 Comparison of test methods.*

Site internet : <http://www.combisol.eu> (accès le 4/11/2011)

[Neymark et Judkoff, 2004]

Neymark, J., Judkoff, R., 2004

*International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method
 for Heating, Ventilating, and Air-conditioning equipment models (HVAC BESTEST)
 Volume 2 : Cases E300-E545*

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task22/> (accès le 7/18/2011)

[Neymark et Judkoff, 2008]

Neymark, J., Judkoff, R., 2008

*International Energy Agency Building Energy Simulation Test and diagnostic method
 (IEA BESTEST). Multi-zone non-airflow in depth diagnostic cases : MZ320 - MZ360
 (Revised Cover)*

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task34/> (accès le 7/18/2011)

[Nguyen et Widrow, 1990]

Nguyen, D., Widrow, B., 1990

*Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of
 the adaptive weights*

Proceeding of the International Joint Conference on Neural Networks, 3, pp.21-26

[Nielsen, 2010]

Nielsen, J.E., 2010

COMBI-EN - Version 1.8.

PlanEnergi DZ, Hvalsö, Denmark

Site internet : <http://www.combisol.eu> (accès le 4/11/2011)

[Nowag, 2007]

Nowag, J., 2004

*Development of a test method to characterize the performance of solar
 combisystems*

Master Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Thermal Energy,
 University of Kassel, Germany

[Nowag, 2007]

Nowag, J., 2004

*Development of a test method to characterize the performance of solar
 combisystems*

Master Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Thermal Energy,
 University of Kassel, Germany

BIBLIOGRAPHIE

[Oussar, 1998]

Oussar, Y., 1998

Réseaux d'ondelettes et réseaux de neurones pour la modélisation statique et dynamique de processus

Thèse de doctorat de l'université Paris 6

[Paoli et al., 2010]

Paoli, C., Voyant, C., Muselli, M., Nivet, M-L., 2010

Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural networks

Solar Energy, 84, pp.2146-2160

[Papillon et al., 2007]

Papillon, P., Letz, T., Albaric, M., Nowag, J., 2007

Solar Combisystems: State of the art and perspectives

Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies, Chambéry

[Perers et Bales, 2002]

Perers, B., Bales, C., 2002

A solar collector model for TRNSYS simulation and system testing. Technical report. IEA Solar Heating and Cooling programme Task 26

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task26/> (accès le 4/22/2011)

[Perers, 1997]

Perers, B., 1997

An improved dynamic solar collector test method for determination of non-linear optical and thermal characteristics with multiple regression

Solar Energy, 59, pp.163-178

[Perez et al., 1988]

Perez, R., Stewart, R., Seal, R., Guertin, T., 1988

The development and verification of the Perez diffuse radiation model. Sandia report SAND88-7030

[Perrin de Brichambaut et Vauge, 1982]

Perrin de Brichambaut, Ch., Vauge, Ch., 1982

Le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique

Ed. Lavoisier, TEC&DOC, Paris, 222 pages

[Peuser et al., 2005]

Peuser, F.A., Remmers, K-H., Schnauss, M., 2006

Installations Solaires thermiques, Conception et mise en œuvre

Ed. Systèmes Solaires, Paris, 403 pages

[RT2005, 2006]

Réglementation Thermique 2005, 2006

Méthode de calcul Th-CE, Annexe à l'arrêté du 19 juillet 2006

Site internet : <http://www.rt->

[batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/pdf/Methode_Th_CE.pdf](http://www.batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/pdf/Methode_Th_CE.pdf) (accès le 11/14/2011)

[Rumelhart et al., 1986]

Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J., 1986

Learning representations by back-propagating errors

Nature, 323, pp.533-536

[Sjöberg et al., 1995]

Sjöberg, J., Zhang, Q., Ljung, L., Benveniste, A., Delyon, B., Glorennec, P.Y., Hjalmarsson, H., Juditsky, A., 1995

Nonlinear black box modelling in system identification : a unified overview

Automatica, 12, pp.1691-1724

[Souliotis et al., 2009]

Souliotis, M., Kalogirou, S., Tripanagnostopoulos, Y., 2009

Modelling of an ICS solar water heater using artificial neural networks and TRNSYS

Renewable Energy, 34, pp.1333-1339

[Thür et al., 2010]

Thür, A., Bredler, J., Kuhness, G., 2010

Combisol project. Solar combisystem promotion and standardisation. D2.4: Updated state of the art report of solar combisystems analysed within Combisol. Combisol Project, Solar Combisystems Promotion and Standardisation

Site internet : <http://www.combisol.eu/> (accès le 3/31/2011)

[Type56, 2005]

TRANSSOLAR, 2005

TRNSYS 16 User Manual - Multizone building modeling with type 56 and TRNBuild

Site internet : <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/user-resources/index.html> (accès le 5/19/2011)

[Vogelsanger, 2002]

Vogelsanger, P., 2002

The Concise Cycle Test method - A twelve day system test. Technical report. IEA Solar Heating & Cooling programme Task26

Site internet : <http://www.iea-shc.org/task26/> (accès le 4/7/2011)

[Walter et Pronzato, 1994]

Walter, E., Pronzato, L., 1994

Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales

Ed. Masson, Paris, 371 pages

BIBLIOGRAPHIE

[Weiss et al., 2003]

Weiss, W. et al., 2003

Solar heating systems for houses, a design handbook for solar combisystems

Ed. James & James Ltd, Londres, 313 pages

[Weiss et Biermayr, 2009]

Weiss, W., Biermayr, P., 2008

Potential of Solar Thermal in Europe

Site internet : <http://www.estif.org/> (accès le 6/12/2011)

[Weiss et Mauthner, 2010]

Weiss, W., Mauthner, F., 2010

Solar Heat Worldwide, Market and contribution to the energy supply 2008. Solar Heating and cooling programme, International Energy Agency. 2010 Edition

Site internet : <http://www.iea-shc.org/> (accès le 3/31/2011)

[Widrow et Stearns, 1985]

Widrow, B., Stearns, S., 1985

Adaptative signal processing

Ed. Prentice-Hall Int., Englewood Cliffs, NJ, 528 pages

ANNEXES

ANNEXE A. Modélisation thermique de bâtiment selon la norme ISO13790 : précision sur les équations et paramétrage des bâtiments SFH

A.1. Equations du modèle de bâtiment

A.1.1. Présentations des équations et calculs selon la norme ISO13790

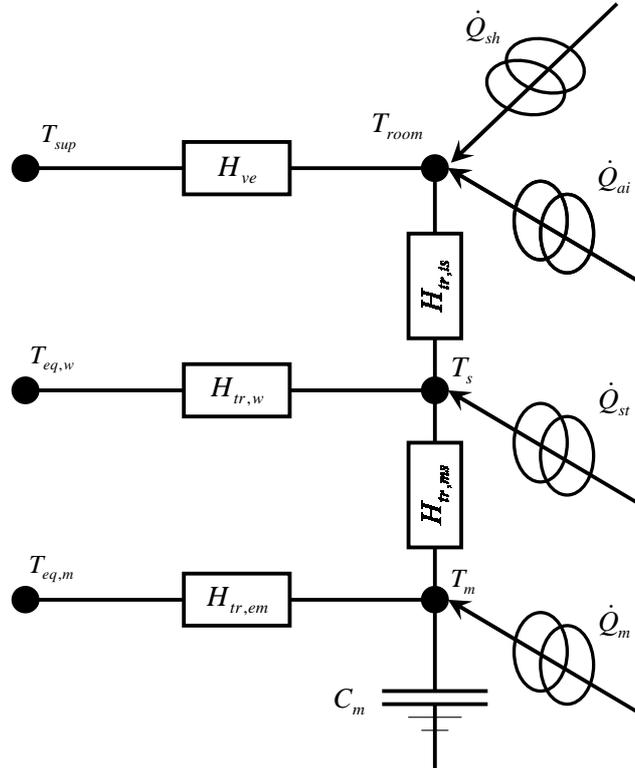


Figure A-1 Schéma électrique du modèle de bâtiment de la norme ISO 13790-2008

Equations de bilan :

$$\begin{aligned}
 C_m \frac{dT_m}{dt} &= H_{tr,em}(T_a - T_m) + H_{tr,ms}(T_s - T_m) + \dot{Q}_m \\
 H_{tr,ms}(T_s - T_m) + H_{tr,w}(T_s - T_a) + H_{tr,is}(T_s - T_{room}) &= \dot{Q}_{st} \\
 H_{ve}(T_{room} - T_{sup}) + H_{tr,is}(T_{room} - T_s) &= \dot{Q}_{ia} + \dot{Q}_{sh}
 \end{aligned}
 \tag{A-1}$$

Les paramètres sont C_m [en J/K] et les coefficients de transfert $H_{tr,em}$, $H_{tr,ms}$, $H_{tr,w}$, $H_{tr,is}$, H_{ve} [en W/K].

Les inconnues sont T_m , T_s et T_{room} [en °C] (si \dot{Q}_{sh} est connu, notre cas) ou \dot{Q}_{sh} [en W] (si T_{room} est connu).

Les données sont les températures $T_{eq,m}$, $T_{eq,w}$, T_{sup} [en °C] et les flux moyens \dot{Q}_m , \dot{Q}_{st} , \dot{Q}_{ai} [en W] ainsi que \dot{Q}_{sh} [en W] ou T_{room} [en °C] selon le cas.

Les flux sont exprimés en fonction des apports de chaleur internes $\dot{Q}_{b,int}$ [en W] et des apports solaires passifs $\dot{Q}_{b,sol}$ [en W], selon les équations (A-2).

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{ia} &= 0,5 \cdot \dot{Q}_{b,int} \\ \dot{Q}_m &= \frac{A_m}{A_{tot}} (0,5 \cdot \dot{Q}_{b,int} + \dot{Q}_{b,sol}) \\ \dot{Q}_{st} &= \left(1 - \frac{A_m}{A_{tot}} - \frac{H_{tr,w}}{9,1 \cdot A_{tot}} \right) (0,5 \cdot \dot{Q}_{b,int} + \dot{Q}_{b,sol})\end{aligned}\quad (\text{A-2})$$

De la 3^e équation de (A-1), on tire :

$$T_{room} = \frac{\dot{Q}_{sh} + \dot{Q}_{ia} + H_{ve} T_{sup} + H_{is} T_s}{H_{ve} + H_{is}} \quad (\text{A-3})$$

En combinant cette expression avec la 2^e équation de (A-1), on obtient :

$$T_s = \frac{\dot{Q}_{st} + H_{tr,ms} T_m + H_{tr,w} T_{eq,w} + U_1 \left(T_{sup} + \frac{\dot{Q}_{sh} + \dot{Q}_{ia}}{H_{ve}} \right)}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + U_1} \quad (\text{A-4})$$

avec

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{H_{is}} + \frac{1}{H_{ve}}} = \frac{H_{is} \cdot H_{ve}}{H_{ve} + H_{is}}$$

Il vient la nouvelle écriture de l'équation différentielle :

$$C_m \cdot \frac{dT_m}{dt} + T_m \cdot (U_3 + H_{tr,em}) = \dot{Q}_{tot}$$

avec :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_m + H_{tr,em} T_{eq,m} + \frac{U_3}{U_2} \left(H_{tr,w} T_{eq,w} + \dot{Q}_{st} + U_1 \left(T_{sup} + \frac{\dot{Q}_{sh} + \dot{Q}_{ai}}{H_{ve}} \right) \right) \\ U_2 = U_1 + H_{tr,w} \\ U_3 = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,ms}} + \frac{1}{U_2}} = \frac{U_2 \cdot H_{tr,ms}}{H_{tr,ms} + U_2} \end{cases} \quad (\text{A-5})$$

A.2. Paramètres du modèle pour simulation des bâtiments de la Tâche 32 de l'IEA

L'IEA, lors de la Tâche 26 [Weiss et al., 2003] et de la Tâche 32 [Heimrath et Haller, 2007], a défini des bâtiments de référence pour homogénéiser les calculs énergétiques. Ces bâtiments ont la même architecture mais sont de qualités thermiques différentes. Ainsi ces bâtiments ont respectivement des besoins de 30 kWh, 60 kWh et 100 kWh par m² de surface habitable et par an pour les conditions climatiques de Zurich. Ils sont appelés respectivement SFH30, SFH60 et SFH100 (SFH pour « Single Family House »²³).

A.2.1. Propriétés principales des bâtiments de références

A.2.1.1. Géométrie du bâtiment

L'orientation et les dimensions du bâtiment sont définies sur la Figure A-2 ci-dessous.

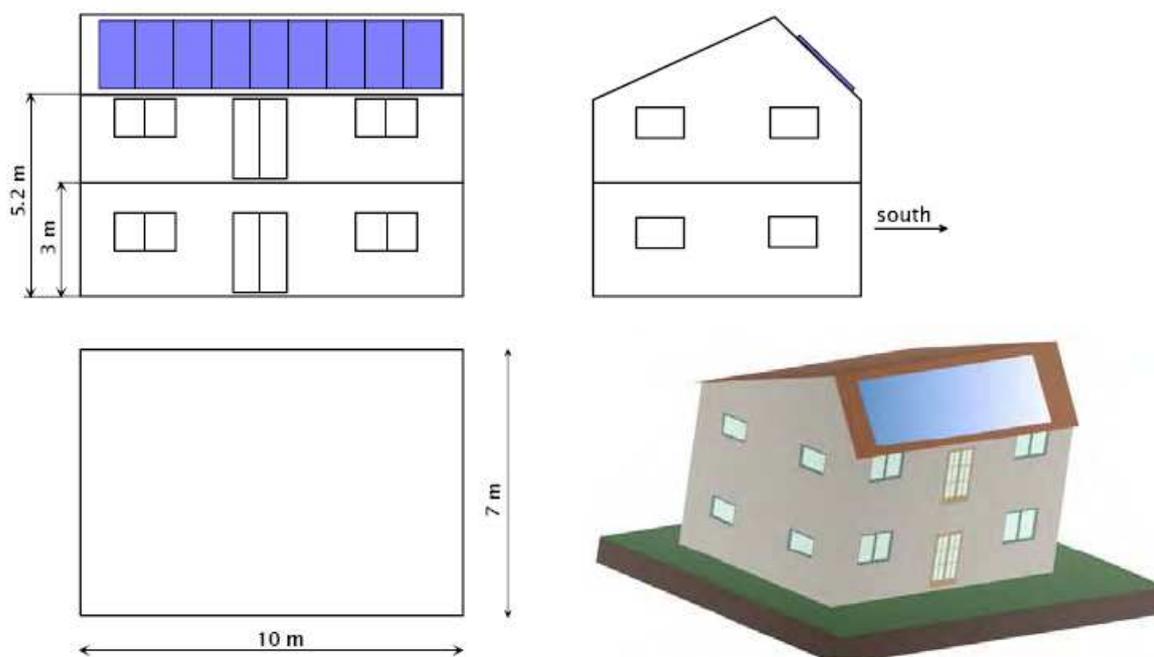


Figure A-2 Géométrie et orientation des SFH définies lors de la Tâche 32

La surface de plancher conditionnée est de 70m² pour chaque étage. Le toit a comme surface 25m² vers le sud et 61,4m² vers le nord. Les surfaces vitrées représentent 24% de la surface sud, 6% de la surface nord et 10% des surfaces est/ouest. Les principales valeurs sont résumées dans le Tableau A-1.

²³ Des bâtiment collectifs appelés « Multi Family Houses » (MFH) sont également définis dans la Tâche32 de l'IEA mais ne sont pas pris en compte dans ce mémoire.

	Valeurs nets						
	Dimensions			Surface de plancher	Surface de façade (N/S)	Surface de façade (E/O)	Volume
	L [m]	W [m]	H [m]	L x W [m ²]	L x H [m ²]	H x W [m ²]	L x W x H [m ³]
Etage	10	7	2,6	70	26	18,2	182
RDC	10	7	3	70	30	21	210
Somme	-	-	-	140	56	39,2	392

Tableau A-1 Valeurs des propriétés géométriques des bâtiments de référence

Pour les surfaces vitrées, les détails sont présentés dans le Tableau A-2 ci-dessous :

	Surface vitrée [m ²]	Proportion de la surface vitrée [%]
Sud	12	24
Est	4	9,9
Ouest	4	9,9
Nord	3	6
Somme	23	12,7

Tableau A-2 Aire des surfaces vitrées sur les bâtiments de référence

A.2.1.2. Structure de l'enveloppe du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment est définie pour les murs extérieurs, le sol et le toit. Pour chaque couche de l'enveloppe, les différents matériaux et leurs propriétés sont définis dans le Tableau A-3 ci-dessous :

	Couches	Epaisseur			Densité kg.m ⁻³	Conductivité W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Capacité kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	U value		
		SFH30	SFH60	SFH100				SFH30	SFH60	SFH100
		m	m	m				W.m ⁻² .K ⁻¹	W.m ⁻² .K ⁻¹	W.m ⁻² .K ⁻¹
Mur	Plâtre intérieur	0,015	-	-	1200	0,600	1,00	0,154	0,283	0,491
	Brique	0,210	-	-	1380	0,700	1,00			
	Isolation EPS	0,240	0,120	0,060	17	0,040	0,70			
	Plâtre extérieur	0,003	-	-	1800	0,700	1,00			
	Somme	0,468	0,348	0,288						
Plancher (sol)	Bois	0,015	-	-	600	0,150	2,50	0,157	0,270	0,561
	Plâtre	0,060	-	-	2000	1,400	1,00			
	Isolation XPS	0,220	0,120	0,060	38	0,037	1,45			
	Béton	0,150	-	-	2000	1,330	1,08			
	Somme	0,445	0,345	0,285						
Plafond (toit)	Placoplâtre	0,025	-	-	900	0,211	1,00	0,119	0,275	0,380
	Contreplaqué	0,015	-	-	300	0,081	2,50			
	Laine de roche	0,280	0,120	0,060	60	0,036	1,03			
	Contre plaqué	0,015	-	-	300	0,081	2,50			
	Somme	0,335	0,175	0,115						
Murs internes	Brique vitrifiée	0,200	-	-	650	0,230	0,92	0,962	0,962	0,962

Tableau A-3 Propriétés des matériaux constituant l'enveloppe des bâtiments de référence

A.2.1.3. Propriétés des surfaces vitrées

Différents types de vitrage sont choisis en fonction de la qualité thermique du bâtiment. Ils sont définis ici par la conductance de leur partie vitrée ($U_{glazing}$ en [W.m⁻².K⁻¹]), la conductance de leur encadrement (U_{frame} en [W.m⁻².K⁻¹]) et leur facteur solaire g_{value} . Ces principales données sont représentées dans le Tableau A-4 suivant :

Bâtiment	$U_{glazing}$	g_{value}	U_{frame}
SFH30	0,52	0,585	1,6
SFH60	1,40	0,622	2,3
SFH100	2,83	0,755	2,3

Tableau A-4 Propriétés optiques et thermiques des surfaces vitrées des bâtiments de référence

A.2.1.4. Ventilation du bâtiment

Une ventilation naturelle de 0,4vol/h est considérée en hiver. En été, une ventilation nocturne active entre 21h et 8h est programmée selon les règles suivantes :

- Si la température moyenne journalière est supérieure à 12°C
- Si la température de la zone est supérieure à 24°C
- Si la température ambiante est 2K sous la température de la zone

A.2.2. Paramétrage des bâtiments de référence selon le modèle ISO13790

A.2.2.1. Géométrie et inertie

La capacité thermique du bâtiment est calculée selon la norme [ISO13786, 2007].

$$C_m = \sum_j \kappa_j \cdot A_j \quad (\text{A-6})$$

κ_j	Capacité thermique surfacique de la surface j	[J.K ⁻¹ .m ⁻²]
A_j	Aire de la surface j	[m ²]

La capacité thermique surfacique peut être calculée exactement à partir des matrices de transfert harmoniques, conformément à la norme ISO13786. L'Annexe A de cette norme précise qu'une formule simplifiée est également possible si la précision de ce calcul est d'importance secondaire. Elle repose sur la profondeur de pénétration d'une onde thermique journalière, calculée pour le matériau adjacent à la surface intérieure :

$$\kappa_j = \sum_i \rho_i \cdot c_i \cdot d_i \quad (\text{A-7})$$

ρ_i	Masse volumique de l'élément i	[kg.m ⁻³]
c_i	Capacité thermique massique de l'élément i	[J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]
d_i	Épaisseur de l'élément i (jusqu'à la limite de l'épaisseur efficace)	[m]

On considère les épaisseurs d_i de manière à ce que $\sum_i d_i = d_T$, où d_T est l'épaisseur efficace d'une face d'une surface, égale à la plus petite des valeurs suivantes :

- La moitié de l'épaisseur totale de la surface ;

- L'épaisseur des matériaux compris entre la face considérée et la première couche isolante, sans tenir compte des revêtements superficiels;
- Une épaisseur efficace maximale, fonction de la période des variations (on considère la valeur par défaut de 100mm pour une période de variation de 1 jour)

A partir des valeurs déterminées ci-dessus, on en déduit A_m , l'aire équivalente des parois qui participent à cette inertie quotidienne.

$$A_m = \frac{C_m^2}{\sum_j \kappa_j^2 \cdot A_j} \quad (\text{A-8})$$

A.2.2.2. Coefficients de transfert thermique

- Entre la température « star » T_s et la température d'air intérieur T_{room}

La conductance de couplage $H_{tr,is}$ entre les nœuds T_s et T_{room} du modèle est estimée par l'équation (A-9).

$$H_{tr,is} = h_{is} A_{tot} = h_{is} \Lambda_{at} A_f \quad (\text{A-9})$$

h_{is}	Coefficient de transfert thermique entre l'air intérieur et le nœud « star » du modèle (fixée à $3,45 \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
A_{tot}	Surface de toutes les parois en contact avec l'air intérieur	$[\text{m}^2]$
Λ_{at}	Ratio entre la surface des parois internes et la surface de plancher, supposée égale à 4,5.	$[-]$
A_f	Surface de plancher conditionnée	$[\text{m}^2]$

- Parois sans inertie

Aux vues des données disponibles, on va considérer ici uniquement les pertes thermiques à travers les surfaces vitrées. Les coefficients $U_{glazing}$ et U_{frame} dépendent du type de bâtiment mais les surfaces vitrées sont les mêmes, égales à 24m^2 au total. L'encadrement de chaque fenêtre est considéré comme représentant 15% de leur surface totale.

$$H_{tr,w} = \sum_i A_i U_i = A_w \cdot (U_{glazing} + F_{frame} U_{frame}) \quad (\text{A-10})$$

$H_{tr,w}$	Coefficient global de transmission thermique des parois sans inertie	$[\text{W.K}^{-1}]$
A_i	Aire de la surface i	$[\text{m}^2]$
U_i	Conductance de la surface i	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
A_w	Aire totale de surface vitrée	$[\text{m}^2]$
F_{frame}	Part de cadre sur l'aire des surfaces vitrées	$[\%]$
$U_{glazing}$	Conductance des fenêtres du bâtiment de référence	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
U_{frame}	Conductance des cadres des fenêtres du bâtiment de référence	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$

ANNEXE A

- Parois opaques

Pour simplifier le calcul des paramètres, la norme internationale pose un coefficient global de pertes des parois opaques $H_{tr,op}$, de manière à ce que $H_{tr,em}$, $H_{tr,ms}$, $H_{tr,op}$ soient liés par l'équation (A-11).

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\left(\frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}} \right)} \quad (\text{A-11})$$

La conductance $H_{tr,ms}$ entre la température des parois avec inertie et la température « star » est estimée par l'équation (A-12).

$$H_{ms} = h_{ms} A_m \quad (\text{A-12})$$

h_{ms} Coefficient de transfert thermique entre les parois avec inertie et le nœud « star » du modèle (fixée à 9,1 W.m⁻².K⁻¹) [W.m⁻².K⁻¹]

La conductance globale de pertes par les parois opaques $H_{tr,op}$ est définie par l'équation (A-13).

$$\begin{aligned} H_{tr,op} &= \sum_i b_i A_i U_i \\ &= A_{roof} U_{roof} + A_{ground} U_{ground} + A_{wall} U_{wall} \end{aligned} \quad (\text{A-13})$$

$H_{tr,op}$	Coefficient de déperdition entre l'extérieur et l'ambiance intérieur	[W.K ⁻¹]
b_i	Coefficient de réduction de transfert relatif à la déperdition de la surface i (nous supposons ici qu'une paroi n'est en contact avec un espace non-conditionné donc $b_i=1$ quel que soit i)	[-]
A_{roof}	Surface de toit isolé (nord + sud)	[m ²]
U_{roof}	Conductance du plafond isolé	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
b_{ground}	Coefficient de correction de la déperdition thermique du sol vers l'extérieur	[-]
A_{ground}	Surface du plancher	[m ²]
U_{ground}	Conductance du sol	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
A_{wall}	Surface totale de mur	[m ²]
U_{wall}	Conductance des murs	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

Pour calculer le coefficient de correction lié aux pertes thermiques par le sol, on s'inspire de la norme [ISO13370, 2008]. Celle-ci définit un coefficient d'échange global moyen annuel H_{ground} tel que les pertes thermiques vers le sol s'expriment par

$$H_{ground} (T_{room} - T_{ext}).$$

$$H_{ground} = A_{ground} \cdot U + P_{ground} \cdot \Psi = A_{ground} U_{ground} \quad (\text{A-14})$$

U	Coefficient global de transmission thermique des parois en contact avec le sol	[W.K ⁻¹]
P_{ground}	Périmètre extérieur du bâtiment	[m]
Ψ	Coefficient linéique de transmission thermique associée à la jonction mur/plancher	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

Des valeurs par défaut du coefficient Ψ peuvent être prises à l'aide des tableaux présentés dans la norme [ISO14683, 1999].

L'expression de U est différente selon la dimension caractéristique du plancher B' et de l'épaisseur équivalente dt pour le calcul des pertes.

$$\begin{cases} B' = \frac{A_{ground}}{0,5 \cdot P_{ground}} \\ dt = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) \end{cases} \quad (\text{A-15})$$

w	Epaisseur des murs extérieurs	[m]
λ	Conductivité thermique du sol (que l'on prendra égale à 2 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ , type sable/gravier, par défaut)	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
R_{si}	Résistance thermique superficielle intérieure	[m ² .K.W ⁻¹]
R_{se}	Résistance thermique superficielle extérieure	[m ² .K.W ⁻¹]
R_f	Résistance thermique du plancher seul	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

En considérant un plancher sur terre-plein (seul cas envisagé dans ce mémoire), il vient :

$$\begin{cases} \text{Si } dt < B', & U = \frac{2\lambda}{\pi B' + dt} \ln\left(\frac{\pi B'}{dt} + 1\right) \\ \text{Si } dt > B', & U = \frac{\lambda}{0,457 B' + dt} \end{cases} \quad (\text{A-16})$$

Pour la conductance de couplage nœud central/air intérieur et le coefficient de déperdition entre la structure et l'ambiance intérieure, respectivement $H_{tr,is}$ et $H_{tr,ms}$, les relations sont fixées par la norme [ISO13790, 2008] de la manière suivante :

$$H_{tr,is} = h_{is} A_{tot} = 3,45 \cdot A_{tot} \quad (\text{A-17})$$

$$H_{tr,ms} = h_{ms} A_m = 9,1 \cdot A_m \quad (\text{A-18})$$

$$A_{tot} = \Lambda_{at} \cdot A_f = 4,5 \cdot A_f \quad (\text{A-19})$$

$H_{tr,is}$	Conductance de couplage entre le nœud central (qui prend en compte la température radiante moyenne) et l'air intérieur	[W.K ⁻¹]
-------------	--	----------------------

ANNEXE A

$H_{tr,ms}$	Coefficient de déperdition entre la structure et l'ambiance intérieure	[W.K ⁻¹]
A_{tot}	Surface totale des parois intérieures	[m ²]
A_m	Surface représentant la masse thermique totale du bâtiment	[m ²]
A_f	Surface de plancher conditionné	[m ²]
h_{is}	Coefficient de transfert thermique entre le nœud « air » et le nœud central	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
h_{ms}	Coefficient de transfert thermique entre le nœud « masse thermique » et le nœud central	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

- Pertes par ventilation

La ventilation dans les bâtiments de référence de la Tâche 32 de l'IEA est calculée de manière complexe en été. Lors de cette période, une ventilation nocturne est prise en compte et nécessite une approche CFD ainsi que des variables supplémentaires. Pour construire une première version simple de modèle de bâtiment, cet aspect est négligé. On ne prendra en compte qu'une ventilation avec un renouvellement d'air de 0,4 volume par heure sur toute l'année, sans ajustement particulier de la température de l'air neuf entrant.

$$H_{ve} = \rho_a c_a q_{ve} = 1200 \frac{\tau.V}{3600} = 0,34.\tau.V \quad (\text{A-20})$$

H_{ve}	Coefficient de déperdition thermique due à la ventilation	[W.K ⁻¹]
ρ_a	Masse volumique de l'air	[kg.m ⁻³]
c_a	Capacité thermique de m'air	[Wh.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
q_{ve}	Débit de ventilation dans le bâtiment	[m ³ .h ⁻¹]
τ	Taux de renouvellement d'air dans le bâtiment	[h ⁻¹]
V	Volume totale d'air dans le bâtiment	[m ³]

A.2.2.3. Nombre de surfaces pour le calcul de l'ensoleillement

Il est nécessaire de définir le nombre et le type de paroi, ainsi que leurs principales caractéristiques pour le calcul de l'ensoleillement et des apports solaires passifs. Les parois considérées ici sont présentées dans le Tableau A-5.

Surface	Type	Orientation	Inclinaison
1	Opaque	Sud	60°
2	Opaque	Nord	20°
3	Opaque	Nord	90°
4	Vitrage	Nord	90°
5	Opaque	Sud	90°
6	Vitrage	Sud	90°
7	Opaque	Est	90°
8	Vitrage	Est	90°
9	Opaque	Ouest	90°
10	Vitrage	Ouest	90°

Tableau A-5 Numérotation et caractéristiques principales des surfaces à considérer dans le modèle ISO13790 des bâtiment SFH30, 60 et 100

A.2.3. Entrées du modèle ISO13790

A.2.3.1. Les températures extérieures

La seule donnée de température disponible dans les fichiers météorologiques utilisés est la température extérieure. On estime donc $T_{eq,m}$, $T_{eq,w}$ comme égales à la température extérieure. C'est également le cas de T_{sup} puisqu'on ne considère pas de dispositions particulières pour le chauffage de l'air neuf entrant.

A.2.3.2. Les puissances de chauffage intérieur

La puissance de chauffage \dot{Q}_{sh} correspond au flux calculé par le modèle du système de chauffage. Pour les apports de chaleur interne (personnes, appareillage électrique,...), on se base sur le profil qui est défini par la tâche 32 de l'IEA (voir [Heimrath et Haller, 2007] et Chapitre 3.1.1) et qui est disponible avec les modèles des bâtiments de référence.

A.2.3.3. Les apports solaires passifs

Les apports solaires passifs sont calculés sur chaque surface par un bilan radiatif.

$$\dot{Q}_{sol,k} = \dot{Q}_{sol,net,k} + \dot{Q}_{r,loss,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} G_{sol,k} - F_{r,k} \dot{Q}_{r,k} \quad (\text{A-21})$$

$\dot{Q}_{sol,k}$	Apport solaire final venant de la surface k	[W.m ⁻²]
$\dot{Q}_{sol,net,k}$	Apport solaire net venant de la surface k	[W.m ⁻²]
$\dot{Q}_{r,loss,k}$	Pertes radiatives globales GLO de la surface k	[W.m ⁻²]
$F_{sh,ob,k}$	Facteur d'ombrage externe sur la surface k	[-]
$A_{sol,k}$	Aire collectrice effective de la surface k	[m ²]
$I_{sol,k}$	Irradiation solaire sur la surface k	[W.m ⁻²]
$F_{r,k}$	Facteur de forme de la surface k par rapport à la voute céleste	[-]
$\dot{Q}_{r,k}$	Flux radiatif GLO vers la voute céleste	[W.m ⁻²]

- Apports solaires nets

On considère qu'il n'y a pas de masques solaires particuliers extérieurs aux bâtiments de référence, donc pour toutes les surfaces $F_{sh,ob,k}$ vaut 1.

ANNEXE A

Le rayonnement solaire incident sur chaque face peut être disponible dans les données météorologiques d'entrée de simulation selon le calcul réalisé. Sinon, la formule exploitée pour le calcul du rayonnement solaire sur la surface des capteurs dans le paragraphe 2.2.2.2 peut être réutilisée.

Le calcul de la surface collectrice effective $A_{sol,k}$ dépend du type de surface.

- Pour les surfaces vitrées :

$$A_{sol,w} = F_{sh,gl} (0,9 \cdot g_{gl}) (1 - F_{frame}) A_w \quad (\text{A-22})$$

$F_{sh,gl}$	Facteur de réduction d'ombrage pour les dispositifs spéciaux	[-]
g_{gl}	Transmittance de la surface vitrée (<i>0,9 est un facteur de correction par défaut</i>)	[-]
F_{frame}	Part de cadre dans la surface vitrée	[-]
A_w	Aire totale de la surface vitrée	[m ²]

Pour le cas présenté ici, on suppose qu'il n'y a pas de dispositif d'ombrage particulier et que la proportion d'aire de cadre des vitres est de 20%.

- Pour les surfaces opaques

Théoriquement, la formule pour la surface collectrice effective des parois opaques est la suivante :

$$A_{sol,op} = \alpha_{S,C} \cdot R_{se} \cdot U_C \cdot A_C \quad (\text{A-23})$$

$\alpha_{S,C}$	Coefficient d'absorption du rayonnement solaire	[-]
R_{se}	Resistance superficielle de la surface extérieure	[m ² .K.W ⁻¹]
U_C	Conductance thermique de la surface opaque	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
A_C	Aire de la surface opaque	[m ²]

La résistance superficielle d'une paroi extérieure peut être estimée de la manière suivante :

$$R_{se} = \frac{1}{h_c + h_r} = \frac{1}{4 + 4v + \varepsilon \cdot h_{r0}} \quad (\text{A-24})$$

h_c	Coefficient de convection	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
h_r	Coefficient de rayonnement	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
v	Vitesse de vent à proximité de la surface	[m.s ⁻¹]
ε	Emissivité hémisphérique de la surface	[-]
h_{r0}	Coefficient de rayonnement d'un corps noir	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

Pour les bâtiments de référence, on considère qu'il n'y a pas de vent ($v = 0 \text{ m.s}^{-1}$).

Le coefficient $h_{r,0}$ est définie par $4\sigma_0 T^3$, où la température T est exprimée en [K] et σ_0 est la constante de Stephan-Boltzmann, égale à $5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$. En considérant une température moyenne de surface externe de 10°C , $h_{r,0}$ peut être estimé $5,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Pour avoir un ordre de grandeur, on peut considérer l'émissivité ε égale à 0,93 pour le toit (ardoise), 0,93 pour les murs (plâtre) et 0,95 pour les vitres (verre).

- Pertes radiatives

Les pertes radiatives des surfaces vers le ciel sont définies de la manière suivante :

$$\dot{Q}_{r,loss,k} = F_{r,k} \dot{Q}_{r,k} = F_{r,k} \cdot R_{se} \cdot U_C \cdot A_C \cdot h_r \cdot \Delta T_{er} \quad (\text{A-25})$$

$F_{r,k}$	Facteur de forme de la surface k par rapport à la voute céleste	[-]
R_{se}	Resistance superficielle de la surface extérieure	$[\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}]$
U_c	Conductance thermique de la surface	$[\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
A_c	Aire de la surface	$[\text{m}^2]$
ΔT_{er}	Différence moyenne entre la température d'air extérieur et la température apparente du ciel	[K]

Le facteur de forme est calculé selon l'inclinaison par rapport au sol de la paroi étudiée β par la formule (A-26).

$$F_{r,k} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (\text{A-26})$$

La différence entre la température extérieure et la température apparente du ciel peut être une donnée extérieure ou bien estimée à 11K pour les régions « intermédiaires » (entre régions polaires et régions tropicales).

A.2.4. Bilan du paramétrage

En considérant les calculs et hypothèses décrits ci-dessus, les paramètres nécessaires au modèle de bâtiment du type ISO13790 pour simuler les bâtiments SFH30, SFH60 et SFH100 sont présentés dans le Tableau A-6 ci-dessous.

ANNEXE A

Paramètre	Unité	SFH30	SFH60	SFH100
C_m	[J.K ⁻¹]	5,86.10 ⁷	5,86.10 ⁷	5,85.10 ⁷
A_m	[m ²]	555	555	554
A_f	[m ²]	140	140	140
$H_{tr,w}$	[W.K ⁻¹]	17,48	40,03	72,92
$H_{tr,op}$	[W.K ⁻¹]	43,49	82,02	132,11
H_{ve}	[W.K ⁻¹]	48,14	48,14	48,14
h_{is}	[W.K ⁻¹ .m ⁻²]	3,45	3,45	3,45
h_{ms}	[W.K ⁻¹ .m ⁻²]	9,10	9,10	9,10
Λ_{at}	[-]	4,50	4,50	4,50

Tableau A-6 Paramètres du modèle ISO13790 des bâtiments SFH30, 60 et 100.

Les hypothèses prises ci-dessus concernant les apports solaires permettent de fixer des paramètres supplémentaires en entrée du modèle ISO13790 :

- En supposant qu'il n'y a pas de disposition d'ombrage spécifique ($F_{sh,gl} = 1$ toute l'année), la surface collectrice effective pour chaque paroi est fixée. Les valeurs sont présentées dans le Tableau A-7.

Entrées (fixes)	Surface	SFH30	SFH60	SFH100
$A_{sol,w}$ [m ²]	1	0,10	0,23	0,32
	2	0,25	0,57	0,79
	3	0,24	0,45	0,78
	4	1,34	1,43	1,73
	5	0,20	0,36	0,63
	6	5,37	5,71	6,93
	7	0,19	0,35	0,60
	8	1,79	1,90	2,31
	9	0,19	0,35	0,60
	10	1,79	1,90	2,31

Tableau A-7 Surfaces collectrices effectives à prendre en compte pour chaque paroi dans le modèle ISO13790 des bâtiments SFH30, 60 et 100.

- Les simplifications faites concernant les pertes radiatives de chaque paroi imposent des valeurs moyennes fixes sur toute l'année (voir Tableau A-8).

Entrées (fixes)	Surface	SFH30	SFH60	SFH100
$\dot{Q}_{loss,r}$ [kJ.h ⁻¹]	1	24	54	75
	2	75	173	238
	3	38	70	122
	4	8	23	46
	5	31	57	99
	6	34	91	183
	7	30	55	95
	8	11	30	61
	9	30	55	95
	10	11	30	61

Tableau A-8 Pertes radiatives à prendre en compte pour chaque paroi dans le modèle ISO13790 des bâtiments SFH30, 60 et 100.

ANNEXE B. Modélisation de la consommation de la chaudière d'appoint selon la Réglementation Thermique 2005

B.1. Formule générale des pertes au point de fonctionnement

La Réglementation Thermique 2005 [RT2005, 2006] évalue les pertes des chaudières par interpolation linéaire entre trois points caractéristiques de leurs fonctionnements (100% de charge, charge intermédiaire et 0% de charge). Il en résulte l'expression de leurs pertes en fonction de la puissance qu'elles doivent fournir (voir l'équation (B-1), valable pour tout type de chaudière, excepté les chaudières bois).

$$\dot{Q}_{aux,loss} = a_{aux} \cdot \dot{Q}_{aux,out}^2 + b_{aux} \cdot \dot{Q}_{aux,out} + c_{aux}$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{aux} = \frac{P_{int} (Q_{P100} - Q_{P0}) - P_n (Q_{Pint} - Q_{P0})}{P_n P_{int} (P_n - P_{int})} \\ b_{aux} = \frac{P_n^2 (Q_{Pint} - Q_{P0}) - P_{int}^2 (Q_{P100} - Q_{P0})}{P_n P_{int} (P_n - P_{int})} \\ c_{aux} = Q_{P0} \end{array} \right. \quad (\text{B-1})$$

$\dot{Q}_{aux,loss}$	Pertes de la chaudière au point de fonctionnement	[kW]
Q_{P100}	Pertes de la chaudière à 100% de charge	[kW]
$Q_{P_{int}}$	Pertes de la chaudière à charge intermédiaire P_{int}	[kW]
Q_{P0}	Pertes de la chaudière à charge nulle	[kW]
P_n	Puissance nominale de la chaudière	[kW]
P_{int}	Puissance intermédiaire (qui correspond à $0,3 P_n$ pour les chaudières à gaz)	[kW]

Remarque : la nomenclature utilisée dans les équations de cette annexe est celle de la RT2005. Elle n'a pas été adaptée à la nomenclature du mémoire pour plus de clarté.

B.2. Expression des pertes caractéristiques

B.2.1. Pertes à 100% de charge

Les pertes à 100% de charge pour tout type de générateur s'expriment en fonction de son rendement à pleine charge R_{Pn} (équation (B-2)).

$$Q_{P100} = \frac{(100 - R_{Pn})}{R_{Pn}} P_n \quad (\text{B-2})$$

Cette expression est adaptée dans le cas de chaudières au gaz ou au fioul pour prendre en compte une augmentation de rendement de 1% chaque fois que la température de la chaudière baisse de 10°C (par rapport à 70°C lors de la mesure du rendement à 100% de charge).

$$Q_{P100} = \frac{(100 - R_{Pn} - 0,1 \cdot (70 - \theta_{wh,g}))}{R_{Pn} + 0,1 \cdot (70 - \theta_{wh,g})} P_n \quad (\text{B-3})$$

La température de fonctionnement de la génération en chauffage $\theta_{wh,g}$ est donnée par l'équation (B-4).

$$\theta_{wh,g} = \max(\theta_{\min}, \theta_{rec,gen})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{rec,gen} = \theta_{wm} \text{ si régulation à température constante} \\ \theta_{rec,gen} = \theta_{wm} + \frac{(\theta_{ei} - \theta_{eb})}{(\theta_{inor} - \theta_{eb})} (\theta_{inor} - \theta_{wm}) \text{ si régulation en fonction de la température extérieure} \\ \theta_{rec,gen} = \frac{\theta_d - \theta_{r,amont}}{2} \text{ si régulation en fonction de la température intérieure} \end{array} \right. \quad (\text{B-4})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{\min} = 20^\circ\text{C} \text{ pour chaudière à condensation} \\ \theta_{\min} = 35^\circ\text{C} \text{ pour chaudière basse température} \\ \theta_{\min} = 45^\circ\text{C} \text{ pour tous les autres générateurs} \end{array} \right.$$

θ_{\min}	Température moyenne minimale de fonctionnement de la génération (valeurs conventionnelles présentées dans l'équation (B-4))	[°C]
$\theta_{rec,gen}$	Température de régulation de la génération	[°C]
θ_d	Température de départ des émetteurs	[°C]
$\theta_{r,amont}$	Température de retour des émetteurs	[°C]
θ_{wm}	Température moyenne de dimensionnement (soit $T_{em,in,d}$)	[°C]
θ_{ei}	Température extérieure (soit T_a)	[°C]
θ_{eb}	Température de base en période de chauffage (soit $T_{a,d}$)	[°C]
θ_{inor}	Température intérieure de consigne (soit $T_{set,room}$)	[°C]

Si R_{Pn} n'est pas connu, la formule par défaut (B-5) peut être utilisée.

$$R_{Pn} = A + B \cdot \log P_n \quad (\text{B-5})$$

Des valeurs de A et B sont données dans Tableau B-2.

B.2.2. Pertes à charge intermédiaire

Les pertes à charge intermédiaire s'expriment en fonction du rendement à charge intermédiaire R_{Pint} (équation (B-6)).

$$Q_{P_{int}} = \frac{(100 - R_{P_{int}})}{R_{P_{int}}} P_{int} \quad (\text{B-6})$$

Cette expression est adaptée dans le cas de chaudières au gaz ou au fioul pour prendre en compte une augmentation de rendement chaque fois que la température de la chaudière baisse pour ce genre de régime.

$$Q_{P_{int}} = \frac{(100 - R_{P_{int}} - a \cdot (\theta_{mes} - \theta_{wh,g}))}{R_{P_{int}} + a \cdot (\theta_{mes} - \theta_{wh,g})} P_n \quad (\text{B-7})$$

Les valeurs de a et θ_{mes} dépendent du type de chaudière et sont données dans le Tableau B-1.

Type de chaudière	a [-]	θ_{mes} [°C]
Standard	0,1	50
Basse température	0,1	40
Condensation	0,2	33

Tableau B-1 Paramètres pour la correction du rendement à charge intermédiaire des chaudières à gaz et au fioul

Si $R_{P_{int}}$ n'est pas connu, la formule par défaut (B-8) peut être utilisée.

$$R_{P_{int}} = C + D \cdot \log P_n \quad (\text{B-8})$$

Des valeurs C et D sont données dans Tableau B-2.

B.2.3. Pertes à charge nulle

Les pertes à l'arrêt Q_{P030} , caractéristiques de chaque chaudière, sont mesurées pour un écart de température de 30°C. Pour les chaudières au gaz ou au fioul, Q_{P0} est exprimée par l'équation

$$Q_{P0} = \frac{Q_{P030}}{100 \cdot R_{P_n}} \left(\frac{\theta_{wh,g} - \theta_{amb}}{30} \right)^{1,25} \quad (\text{B-9})$$

θ_{amb} Température de l'air ambiant autour de la chaudière, prise à 20°C [°C]

Si Q_{P030} n'est pas connu, la formule par défaut (B-10) peut être utilisée.

$$Q_{P030} = P_n \cdot (E + F \cdot \log P_n) / 100 \quad (\text{B-10})$$

Des valeurs de E et F sont données dans Tableau B-3.

B.3. Coefficients des valeurs par défaut

Type de chaudière	A	B	C	D
Standard	84	2	80	3
Basse température	87,5	1,5	87,5	1,5
Condensation	91	1	97	1

Tableau B-2 Coefficients pour le calcul des rendements par défaut des chaudières gaz ou fioul

Présence de ventilateur ou autre dispositif de circulation d'air ou de produit de combustion dans le circuit de combustion	E	F
Non	2,5	-0,8
Oui	1,75	-0,55

Tableau B-3 Coefficients pour le calcul des pertes à charge nulle par défaut des chaudières à combustible liquide ou gazeux