



HAL
open science

Outil d'aide à la décision pour la conception de maisons solaires à énergie positive

Jérémy Bois

► **To cite this version:**

Jérémy Bois. Outil d'aide à la décision pour la conception de maisons solaires à énergie positive. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2017. Français. NNT : 2017BORD0679 . tel-01679255

HAL Id: tel-01679255

<https://theses.hal.science/tel-01679255>

Submitted on 9 Jan 2018

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 PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR
SPÉCIALITÉ MÉCANIQUE

Par **Jérémy BOIS**

**Outil d'Aide à la Décision pour la Conception de Maisons Solaires à
Énergie Positive**

Sous la direction de : Elena PALOMO DEL BARRIO et Etienne WURTZ
Encadrée par : Laurent MORA

Soutenue publiquement le 9 Octobre 2017

Membres du jury :

Patrice JOUBERT, Professeur à l'Université de La Rochelle.	Président du jury
Bruno PEUPORTIER, Responsable Scientifique à MINES ParisTech.	Rapporteur
Michel PONS, Directeur de Recherche CNRS (LIMSI).	Rapporteur
Giles RUSAOUËN, Maître de conférences au Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon.	Examineur
Elena PALOMO DEL BARRIO, Professeur à l'Université de Bordeaux.	Directrice de thèse
Etienne WURTZ, Directeur de Recherche CNRS, LEB, CEA-INES.	Co-Directeur de thèse
Laurent MORA, Maître de Conférence à l'Université de Bordeaux.	Encadrant de thèse

RÉSUMÉ

Les enjeux énergétiques et environnementaux liés au réchauffement climatique amènent à généraliser la sobriété énergétique des bâtiments neufs ainsi que la production locale d'énergie à l'horizon 2020. Ce travail de thèse se concentre sur le secteur de la maison individuelle qui représente près de la moitié des logements neufs construits en France pour un volume d'environ 200000 unités par an.

Le contexte de la maison individuelle à énergie positive 100 % solaire consiste à rechercher les compromis entre le niveau de performance du bâti qui détermine les besoins en énergie et la capacité des équipements à valoriser l'énergie solaire pour d'une part subvenir aux besoins en chaleur pour assurer le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, et d'autre part produire l'électricité nécessaire à l'éclairage et aux autres usages spécifiques (matériels électroménager, vidéo, etc.).

Après un examen des différents concepts de bâtiments à énergie positive, une analyse a été menée pour identifier les solutions techniques de systèmes solaires combinés capables de fournir le double service de production d'eau chaude et de chauffage. Un modèle détaillé a été développé dans l'environnement Dymola et vérifié par inter-comparaison de modèles à l'échelle des composants. Un algorithme de contrôle original a été mis au point pour maximiser la performance globale du système. Une première étude paramétrique a montré que ce système est capable dans certaines conditions de couvrir près de 80 % des besoins en chaleur de la maison étudiée. Néanmoins, son dimensionnement demeure complexe et la recherche de compromis entre la sobriété de la maison et le dimensionnement des systèmes solaires thermiques et photovoltaïques doit s'appuyer sur un algorithme d'optimisation multi-objectifs adapté.

Un chapitre est donc consacré à l'élaboration d'un algorithme d'optimisation multi-objectifs qui s'appuie sur la méthode des colonies d'abeilles virtuelles. Cette approche s'est avérée particulièrement pertinente vis à vis du problème (paramètres discrets, continus et qualitatifs) à caractère multi-objectifs (maximiser la valorisation du solaire thermique pour le chauffage d'une part et pour la production d'eau chaude d'autre part, minimiser la consommation d'énergie conventionnelle) et sous contrainte car seules les solutions à bilan d'énergie positif sur l'année seront retenues. L'algorithme d'optimisation développé ici a été confronté à une série de problèmes classiques et a démontré sa capacité à construire l'ensemble des solutions avec un nombre relativement faible d'évaluations du modèle.

Le dernier chapitre présente deux applications de conception de maisons à énergie positive. La première se situe en région bordelaise alors que la seconde est située à proximité de Strasbourg. Ces deux conditions climatiques permettent de mettre en évidence la capacité de l'algorithme d'optimisation à proposer un éventail de solutions optimales présentant des compromis différents en termes de performance du bâti et de dimensionnement des équipements solaires. Enfin, un outil d'aide à la décision permet d'explorer les fronts optimaux pour dégager les solutions à retenir.

Mots clés : Système solaire combiné, Bâtiment à énergie positive, Optimisation multi-objectifs, Aide à la décision, Modélisation, Modelica, Dymola

ABSTRACT

With energy-related and environmental climate change challenges, energy sobriety and local energy production are yet to become a mainstream practice for new buildings construction by 2020. This work focuses on single-family houses which in France represent half of new buildings constructions with 200000 new units new units each year.

Near zero energy single-family houses with 100 % solar energy consists on compromising between performance of building envelope which defines energy needs and the ability for equipments to value free solar energy. Hence solar energy must be able to cover space heating and domestic hot water demands but also provide enough energy for lightning and other specific uses such as domestic appliances.

After a literature review of near zero energy house concepts, an analysis was undertaken to provide a clear view of solar combi-systems technical solutions with the ability to provide enough energy for both needs : space heating and domestic hot water. Using Dymola environment a detailed model was developed and its consistency was checked by inter-comparison at component scale. An innovative control algorithm has been worked out to maximize the solar system's global performance. A first parametric study has shown that the system was able to cover close to 80 % of house heat requirement. However sizing of a solar combi-system is a complex task and requires to find compromises between building sobriety, solar thermal energy efficiency, and photovoltaics solar energy sizing. Because of the problem's complexity, a decision aid tool with an appropriate multi-criteria optimization algorithm is required.

To that end a chapter is dedicated to the development of a multi-criteria optimization algorithm based on artificial bee colony behavior. This approach has proved to be quite effective to solve the problem and to handle continuous, discrete and qualitative decision variables. Chosen solution was constrained to have a positive energy balance and must maximize solar space heating and domestic fraction in a view to reduce total energy consumption. A validation process has also been set up and the developed optimization algorithm has proved its ability to solve standard problems with a fairly short number of evaluations.

Adopted methodology was illustrated by two applications of the design phase of a near zero energy detached house. First one is located at Bordeaux an second one in Strasbourg. Selected climate conditions emphasize the ability of the proposed approach to identify a wide range of optimal solutions showing differences within the building's performance as well as the solar system sizing. Lastly a decision aid tool allows to explore optimal front in a convenient way to shape adapted solutions.

Keywords : Solar combi-system, Nearly ZEB, Multi-criteria optimisation, Décision analysis, Modeling, Modelica, Dymola

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien d'un certain nombre de personnes. Je tiens donc à les remercier...

Je commence donc par mes encadrants qui m'ont proposé un sujet passionnant et offert une grande liberté dans la manière de l'aborder :

- **Laurent Mora** : Suite à mon stage de fin d'études **Laurent** m'a proposé de réaliser une thèse. Alors que ma formation ne m'y destinait pas, il a su m'apporter la confiance nécessaire pour entreprendre cette aventure. Il a aussi tout au long de ces travaux su alimenter ma réflexion grâce à de nombreuses interrogations pertinentes et une vision globale de la portée du sujet mais aussi du domaine du bâtiment. Je le remercie aussi pour m'avoir permis de réaliser des heures d'enseignements à l'IUT Génie Civil en parallèle de mes travaux.
- **Etienne Wurtz** : Tout comme Laurent, j'ai rencontré **Etienne** durant mon stage de Master 2. Il a su amorcer de nombreux débats sur la manière d'aborder le sujet et a toujours veillé à s'assurer que je me force à prendre plus de recul sur mon sujet.

Je souhaite également remercier les membres du jury en commençant par les rapporteurs, **Bruno Peuportier** et **Michel Pons**, pour la relecture attentive et l'analyse du fond comme de la forme de ce manuscrit. Merci aussi à **Patrice Joubert** d'avoir accepté de présider le jury de thèse et **Giles Rusaouën** d'être venu assister et débattre autour de mon travail.

Bien sûr ces travaux ont nécessité l'acquisition de nombreuses compétences. Je souhaite donc remercier **Stéphanie Decker** pour m'avoir accordé une partie de son temps pour me présenter son approche d'optimisation. Je remercie aussi l'entreprise **SolisArt** pour les nombreux échanges autour du système solaire combiné qui ont permis d'amorcer la réflexion pour ces travaux. De même le travail réalisé dans le cadre du projet **COMEPOS** avec l'entreprise **IGC** m'ont permis d'avoir un regard extérieur nécessaire sur mes avancements.

Sans surprise je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire avec lesquelles j'ai eu l'occasion de discuter et en particulier **Muriel** pour sa disponibilité et réactivité malgré mes demandes de dernières minutes (je suppose que l'on apprend de ces mentors...).

Ces travaux m'ont aussi permis de rencontrer de nombreuses personnes d'origines et parcours divers. Étant resté près de 4 ans dans les locaux j'ai eu l'occasion de voir passer de nombreuses personnes dans le bureau. Merci à **Tan** (en particulier pour la découverte de la nourriture vietnamienne), **Miguel** (j'espère ne pas avoir été trop chiant sur la climatisation...), **Marita** (« La patilla del cambio! »), **Tom** (j'attends toujours ma viande séchée...), **Yibao** (profite bien du vélo!). J'ai aussi rencontré ma première chérie (oui **José** je parle bien de toi si tu lis cette page!) et réussi à infiltrer la communauté Corse (j'espère que tu vas m'inviter chez toi un de ces jours **Anto!**). Je remercie bien sûr aussi **Stéphanie**, **YingYing**, **Yohann**, **Guilio**, ...

La thèse a aussi été l'occasion de rencontrer des personnes qui me sont aujourd'hui très proches. J'ai aussi eu le plaisir de rencontrer **Hugo** qui m'a transmis une partie de sa passion pour ~~la montagne~~ les Pyrénées. Il m'a aussi fait l'honneur de me choisir comme Parrain pour sa formidable (l'adjectif ne m'engage pas dans le futur) petite fille. J'ai eu la chance (ton mot préféré...) de rencontrer ma véritable petite chérie (la seconde du coup...), **Maimouna**. Je suis heureux de toujours être à ses côtés aujourd'hui encore. Je pense qu'ils ont été à eux deux le pilier sur lequel je pouvais me reposer lors des moments difficiles.

Je remercie bien sûr la salle d'escalade (**Rock'Altitude** si tu me lis...) pour m'avoir permis de vider mon esprit et de faire des rencontres éphémères sur les différents blocs. Aussi merci à **Youpi** pour sa joie de vivre et son insouciance.

Je n'oublie pas **mes parents** et **grands-parents** qui m'ont soutenu et qui m'ont permis de me construire et de devenir ce que je suis aujourd'hui (merci pour les pâtisseries et les bons petits plats...).

Je finis ce chapitre avec **Maimouna** qui m'a supporté professionnellement comme personnellement d'une manière incroyable et avec qui je continue ma petite vie...

SOMMAIRE

Introduction	23
I Le solaire thermique appliqué au bâtiment, un problème multi-objectifs	25
I.1 Objectifs	26
I.2 L'Homme au centre d'un trouble climatologique	27
I.2.1 Le réchauffement climatique : origines et conséquences	27
I.2.2 Vers une prise de conscience collective	30
I.3 Vers le bâtiment à énergie positive	33
I.3.1 Un long chemin déjà parcouru	33
I.3.2 Description générale du concept de BEPOS	35
I.3.3 La complexité de la définition d'un cadre international	35
I.3.4 L'approche européenne	39
I.3.5 Les initiatives françaises	40
I.3.6 Bilan sur la maison à énergie positive	42
I.4 Les systèmes solaires	42
I.4.1 Du soleil à la Terre	43
I.4.2 Valoriser l'énergie solaire	49
I.4.3 Le solaire thermique en chiffres	54
I.4.4 Les travaux sur le solaire thermique	57
I.5 Conception de maisons solaires à énergie positive	66
I.5.1 Critique de l'approche actuelle dans le bâtiment	66
I.5.2 Approche proposée	66
I.5.3 Bilan	68
II Modélisation détaillée d'un système solaire combiné innovant	69
II.1 Modélisation détaillée d'un système solaire combiné	70
II.1.1 Le choix de la modélisation	70
II.1.2 Le choix de l'outil de modélisation	71
II.1.3 Outils complémentaires	74
II.1.4 Bilan	75
II.2 Application à la modélisation du cas d'étude	76
II.2.1 Modélisation de l'enveloppe	76
II.2.2 Scénarios de référence	78
II.2.3 Description du système solaire	80
II.2.4 Logique de contrôle	84
II.2.5 Bilan	89
II.3 Étude paramétrique	89
II.3.1 Climats étudiés	89
II.3.2 Scénarios étudiés	90
II.3.3 Variations techniques étudiées	93
II.3.4 Analyse des résultats	94

II.4	Vers une méthodologie d'aide à la décision	103
III	Développement d'une méthode d'aide à la décision	105
III.1	Les méthodes d'aide à la décision	106
III.1.1	Introduction	106
III.1.2	Les approches existantes	107
III.1.3	Approche retenue	110
III.2	Simplification de modèles en thermique du bâtiment	110
III.2.1	Réduction de la cardinalité du problème	111
III.2.2	Modèles de substitution	113
III.2.3	Approche retenue	116
III.3	Sélection d'une approche d'optimisation multi-objectifs	116
III.3.1	Vocabulaire et Définition	117
III.3.2	Les méthodes exactes	119
III.3.3	Les méthodes approchées	120
III.3.4	Les méta-heuristiques	121
III.4	Algorithme de Colonie d'abeilles virtuelles	125
III.4.1	Inspiration	127
III.4.2	Principe de fonctionnement	127
III.4.3	Vol de Lévy	131
III.4.4	Apprentissage par vecteur opposé	132
III.4.5	L'épsilon-dominance	133
III.4.6	Tenir compte des contraintes	135
III.4.7	Description de l'approche globale	137
III.4.8	Validation de la méthode	138
III.5	Bilan	141
IV	Optimisation multi-objectifs d'un SSC couplé à une MEPOS	145
IV.1	Description de l'étude de cas	146
IV.1.1	Hypothèses	146
IV.1.2	Définition des paramètres a priori	148
IV.1.3	Définition des objectifs	151
IV.2	Méthode de criblage de Morris	153
IV.2.1	Hypothèses	153
IV.2.2	Analyse des résultats	154
IV.2.3	Paramètres retenus a posteriori	161
IV.3	Construction des modèles de substitution	161
IV.3.1	Création de l'échantillon	163
IV.3.2	Sélection des méta-modèles	164
IV.4	Optimisation multi-objectifs	165
IV.4.1	Paramétrage de l'optimisation	167
IV.4.2	Évaluation de la progression de l'optimisation	168
IV.4.3	Qualité de l'approximation sur les fronts de Pareto	168
IV.4.4	Analyse globale des solutions non-dominées	169
IV.4.5	Influence des capteurs photovoltaïques	173
IV.4.6	Influence des capteurs solaires thermiques	174
IV.4.7	Influence du volume des ballons	178
IV.4.8	Influence des autres paramètres	179

IV.4.9	Corrélation entre performance de l'enveloppe et SSC	181
IV.4.10	Exploration du front de Pareto	183
IV.5	Bilan	185
Conclusions et Perspectives		189
Références bibliographiques		193
Annexes		205
A	Énergie	207
B	Construction d'un bâtiment	209
C	Bâtiment	211
D	Modélisation du système solaire combiné	215
E	Répartition des capteurs	225
F	Analyse de sensibilité	227
G	Création des méta-modèles	233
H	Optimisation multi-objectifs	235

LISTE DES FIGURES

I.1	Répartition des sources de production en énergie primaire pour 1973 et 2014	28
I.2	Évolution de la concentration anthropique mondiale en CO ₂	29
I.3	Mise en évidence des effets anthropiques globaux et à l'échelle de la région	30
I.4	Principe du développement durable et du scénario négaWatt	31
I.5	Description du secteur énergétique français	34
I.6	Représentation schématique du bilan d'un <i>Net ZEB</i>	37
I.7	Description des quatre axes amenant à l'attribution du titre de <i>nearly ZEB</i>	40
I.8	Irradiation globale horizontale en Europe	44
I.9	Exemple de pyréliomètre et de pyranomètre avec écran	45
I.10	Comparaisons mensuelles de l'irradiation solaire entre un fichier typique et des données réelles	45
I.11	Construction d'une année typique (TMY) selon la méthode <i>Sandia</i>	47
I.12	Représentation des différents angles solaires	49
I.13	Description des capteurs plans	50
I.14	Description d'un capteur sous-vide et exemple d'un capteur cylindro-paraboliques	51
I.15	Comparaison entre la méthode statique et la méthode quasi-dynamique	54
I.16	Évolution tendancielle du solaire thermique, éolien, et photovoltaïque	56
I.17	Comparaisons de la performance des SSC étudiés dans la tâche 26	60
II.1	Différences entre modélisation acausale et causal	74
II.2	Plan du bâtiment utilisé à travers ces travaux	76
II.3	Représentation du bâtiment sous <i>Modelica</i>	77
II.4	Évolution des besoins de chauffage entre le modèle mono-zone et multi-zone	79
II.5	Profil de référence pour les charges internes et la consigne de chauffage	80
II.6	Description schématique du système solaire couplé à la ventilation	81
II.7	IAM pour le rayonnement direct	83
II.8	Comparaisons de l'irradiation entre <i>TrnSys</i> , <i>Modelica</i> et des résultats expérimentaux	83
II.9	Description schématique des différents modes de fonctionnements du SSC	84
II.10	Types de Contrôleurs	86
II.11	Illustration du fonctionnement d'un automate fini	86
II.12	HFSM contrôlant la transition entre les différents modes de chauffage	87
II.13	Fonctionnement de la régulation du chauffage par vecteur air	88
II.14	Principe de la surchauffe diurne durant une journée hivernale	88
II.15	Récapitulatif du fonctionnement couplé du système solaire combiné et du bâtiment.	89
II.16	Cartographie des villes sélectionnées pour l'étude paramétrique	90
II.17	Description des profils de puisage envisagés	91
II.18	Évolution des température internes des ballons du SSC	97
II.19	Impact de la température de consigne sur la performance du SSC	98
II.20	Évolution annuelle des charges internes et des besoins du bâtiment	99
II.21	Évolution mensuelle de la répartition des consommations à Bordeaux	100

II.22	Impact de la position de l'échangeur solaire sur la performance du SSC	100
II.23	Impact du profil de puisage sur la performance du SSC	101
III.1	Description des catégories existantes pour une variable	107
III.2	Transformation d'un problème multi-objectifs en optimisation mono-objectif	108
III.3	Principe de la visualisation par coordonnées parallèles	110
III.4	Classement des méthodes d'analyse de sensibilité selon Iooss 2011	111
III.5	Illustration du fonctionnement de la méthode de Morris	112
III.6	Exemple de résultats de la méthode de Morris	114
III.7	Échantillon suivant la méthode de Monte-Carlo et de Quasi-Monte-Carlo	115
III.8	Description de la méthode d'aide à la décision envisagée	117
III.9	Dominance au sens de Pareto	119
III.10	Illustration du Point Idéal et du point Nadir	120
III.11	Transformation d'un problème multi-objectifs en optimisation par méthodes exactes . .	121
III.12	Illustration de l'utilisation d'une heuristique	122
III.13	Transformation d'un problème multi-objectifs en optimisation multi-objectifs	122
III.14	Popularité de l'algorithme de colonies d'abeilles ABC	127
III.15	Organisation sociale des abeilles lors de la recherche de nourriture	128
III.16	Évolution du nombre de publication utilisant l'algorithme ABC	130
III.17	Densité de probabilité de différentes loi de distribution	131
III.18	Mouvement brownien et vol de Lévy pour 200 pas aléatoires	133
III.19	Principe de la mise à jour de l'archive par epsilon-dominance	135
III.20	Description globale de l'algorithme ABC pour les problèmes multi-objectifs	138
III.21	Front de Pareto obtenu pour trois problèmes distincts	143
III.22	Outils utilisés pour la mise en place de la méthodologie d'aide à la décision	144
IV.1	Évolution mensuelle du potentiel solaire sur Bordeaux et Strasbourg	147
IV.2	Évolution de l'IAM en fonction de l'angle d'incidence	150
IV.3	Résultat de l'analyse de Morris pour les indicateurs principaux	155
IV.4	Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{CH} (f(\mu) = \sigma)$	157
IV.5	Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Conso_{app} (f(\mu^*) = \sigma)$	159
IV.6	Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{valorisée} (f(\mu^*) = \sigma)$	160
IV.7	Graphe d'influence du SSC pour Bordeaux et Strasbourg	162
IV.8	Évolution de la fidélité du méta-modèle pour le système de référence	164
IV.9	Évolution de la RMSE sur le SSC en fonction de l'échantillon	165
IV.10	Évaluation de la précision des méta-modèles pour les solutions de l'échantillon	166
IV.11	Évolution de la convergence et de la diversification de l'optimisation	169
IV.12	Évaluation de la précision des méta-modèles pour les solutions optimales	170
IV.13	Front de Pareto sur Bordeaux pour les quatre objectifs après 400 itérations	172
IV.14	Front de Pareto sur Strasbourg pour les quatre objectifs après 400 itérations	172
IV.15	Évolution de la performance globale du SSC en fonction du nombre de capteurs PV . . .	173
IV.16	Occurrences de chaque type de capteurs pour les solutions du front de Pareto	174
IV.17	Évolution de la performance du SSC en fonction du type de capteurs sur Strasbourg . .	175
IV.18	Fronts de Pareto pour les différents types de capteurs sur Strasbourg	177
IV.19	Performance du SSC sur Strasbourg en fonction du nombre de capteurs solaires thermiques	178
IV.20	Occurrences de chaque sous-groupe de taille de ballon pour les solutions du front de Pareto	179
IV.21	Performance du SSC sur Strasbourg en fonction du volume des ballons	180
IV.22	Évolution de la performance du SSC en fonction de la qualité de l'enveloppe	181

IV.23	Corrélation entre la qualité de l'enveloppe et la performance du SSC sur Strasbourg	183
IV.24	Évolution de l'aide à la décision en fonction de choix fictif d'un décideur	186
D.1	Représentation de l'ensemble du SSC et du bâtiment sous <i>Dymola</i>	216
D.2	Représentation de l'algorithme de contrôle sous <i>Dymola</i>	217
D.3	Fiche technique du circulateur <i>Wilo-YonosECO 25/1-5 BMS</i>	219
D.4	Certification <i>Solar Keymark</i> pour le capteur <i>Kloben Sky Pro 12 CPC58</i>	220
D.5	Certification <i>Solar Keymark</i> pour le capteur <i>Sonnenkraft IDMK-25AL</i>	221
D.6	Certification <i>Solar Keymark</i> pour le capteur <i>Dima Energy + Eco</i>	222
D.7	Certification <i>Solar Keymark</i> pour le capteur <i>Ritter CPC 14 Star</i>	223
E.1	Représentation schématique du problème de calepinage	226
F.1	Résultat de l'analyse de Morris pour les indicateurs principaux ($f(\mu) = \sigma$)	228
F.2	Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{CH}$ ($f(\mu^*) = \sigma$)	229
F.3	Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Conso_{app}$ ($f(\mu) = \sigma$)	230
F.4	Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{valorisée}$ ($f(\mu) = \sigma$)	231
G.1	Évolution de la fidélité des méta-modèles pour le SSC	234
H.1	Répartition des solutions en fonction des sous-groupes de taille de ballon pour Bordeaux	236
H.2	Répartition des solutions en fonction des sous-groupes de taille de ballon pour Strasbourg	237
H.3	Répartition des solutions en fonction de faibles volumes de ballons	238

LISTE DES TABLEAUX

I.1	Différences principales entre les différents modèles modélisés dans la tâche 26	61
II.1	Description de la performance des parois opaques	77
II.2	Détail du calcul du U_g et du g selon NF EN 673 (2011) et NF EN 410 (2011)	77
II.3	Récapitulatif des puissances dissipées en fonction des pièces	79
II.4	Caractéristiques techniques des ballons de référence (stockage et sanitaire)	82
II.5	Caractéristiques du capteur de référence (<i>Sonnenkraft IDMK 25-AL</i>)	82
II.6	Description des différents climats retenus	90
II.7	Température de l'eau du réseau en fonction de la position géographique	91
II.8	Détail des coefficients de pondération journaliers pour le profil de puisage Réaliste . . .	92
II.9	Détail des coefficients de pondération mensuels pour le profil de puisage Réaliste	92
II.10	Variations envisagées pour la consigne de chauffage en fonction de la période	92
II.11	Caractéristiques des deux fluides caloporteurs utilisés pour la modélisation	93
II.12	Variations algorithmiques étudiées lors de l'étude paramétrique	94
II.13	Description de la solution de référence et de variations étudiées	95
II.14	Performances annuelles du système solaire pour différents climats	96
III.1	Nombre de paramètres à déterminer pour différents méta-heuristiques à population . .	126
III.2	Évaluation des solutions des fronts de Pareto obtenues à partir de différents algorithmes	142
IV.1	Liste des paramètres a priori utilisés pour l'analyse de sensibilité	149
IV.2	Caractéristiques des capteurs solaires thermiques sélectionnés	151
IV.3	Descriptif des caractéristiques des différents vitrages envisagés	151
IV.4	Variabilité des caractéristiques des capteurs et des vitrages pour l'étude de sensibilité . .	154
IV.5	Description des paramètres retenus pour l'optimisation	162
IV.6	Erreurs caractéristiques des huit méta-modèles retenus	166
IV.7	Erreurs caractéristiques des méta-modèles sur l'échantillon de validation et sur les solutions non-dominées	169
IV.8	Performance maximale pouvant être obtenue pour différents indicateurs	171
IV.9	Performance maximale pouvant être obtenue pour les différents capteurs solaires sur Strasbourg	175
IV.10	Détail des solutions optimales sélectionnée sur Strasbourg	185
A.1	Coefficients conventionnels de passage en énergie primaire non renouvelable	207
C.1	Description détaillée des vitrages du bâtiment	212
C.2	Caractéristiques des vitrages en façades.	212
C.3	Caractéristiques de la fenêtre de toit	212
C.4	Caractéristiques des gaz	212
C.5	Description des parois de l'extérieur vers l'intérieur	213

LISTE DES ALGORITHMES

1	Principe de l'algorithme ABC	129
2	Initialisation des sources par OBLM	139
3	Phase des éclaireuses	139
4	Phase des ouvrières	139
5	Mise à jour des Sources par les Abeilles	140
6	Phase des butineuses	140

NOMENCLATURE

Abréviations

BEPOS	Bâtiment à Energie POSitive
CH	Chauffage
COMEPOS	Conception et construction Optimisées de Maisons à Énergie POSitive
Conso	Consommation
DJU	Degré Jour Unifié
Ech	Échangeur
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EnR	Énergie renouvelable
FMU	Functional Mock-up Unit
FSM	Finite State Machine
hab	habitant
HFSM	Hierarchical Finite State Machine
IR	Infrarouge
MEPOS	Maison à Energie POSitive
PID	Proportionnelle Intégrale Dérivée
Prod	Production
PV	Panneaux photovoltaïques
RT	Réglementation Thermique
SSC	Système Solaire Combiné
Surf	Surface
UV	Ultra Violet
VMI	Ventilation Mécanique par Insuflation

Lettres grecques

η	Rendement optique surfacique d'un capteur	%
η_0	Rendement optique d'un capteur sans pertes	%
λ	Conductivité thermique	W/(m.K)
τ	Taux de transmission	
a_1	Coefficient de pertes linéiques d'un capteur	W/(m ² .K)
a_2	Coefficient de pertes surfaciques d'un capteur	W/(m ² .K ²)
IMDiff	Coefficient modulateur de la part solaire diffuse absorbée	%

Indices

abs	absorbée
app	appoint
CH	chauffage
cs	constante solaire
dif	diffuse / diffus
diff	différence
dir	directe / direct
ep	épaisseur
ext	extérieur
f	frame (cadre)
g	glass (vitrage)
in	incident
inc	sur une surface inclinée
int	intérieur
IR	Infrarouge
mod	modulation
nor	sur une surface normale à la propagation
p	profil
pos	position
r	réfléchi

sol	solaire
souff	soufflage
th	thermique
tot	totale
vol	volume
w	window (fenêtre)

Lettres latines

C_p	Capacité calorifique massique	J/(kg.K)
Q_v	Débit volumique	m ³ /h
e	Épaisseur	m
G	Rayonnement ou densité du flux énergétique	W/m ²
g	Facteur solaire	–
h	Coefficient d'échange surfacique	W/(m ² .K)
I	Ensoleillement	kWh/m ²
L	Longitude	°(ouest)
R	Résistance thermique	(m ² .K)/W
T	Température	K
U	Coefficient de transmission thermique	W/(m ² .K)

INTRODUCTION

Les effets du réchauffement climatique sont aujourd'hui facilement observables et sont tels qu'ils bouleversent le fonctionnement de la planète. L'énergie considérée comme infinie durant les 30 glorieuses s'est avérée être limitée et la sur-utilisation des énergies fossiles comme nocive pour la faune et la flore. Des mesures sont alors prises au niveau international et national afin de contenir le réchauffement climatique et éviter un dérèglement plus important. Dans le bâtiment, les mesures visent principalement la diminution de la production de CO₂ et des dépenses énergétiques, grâce à l'amélioration de la qualité de l'enveloppe et de l'efficacité énergétique. Le bâtiment est en effet le premier consommateur d'énergie en France et apparaît donc comme un élément clé pour la réussite de la transition énergétique. Avec près de 200 000 nouveaux chantiers terminés par an, la conception de maisons individuelles performantes et respectueuses de l'environnement est indispensable pour réduire la facture énergétique et le coût des rénovations futures. Cette progression vers un développement toujours plus exemplaire est encadrée par la réglementation thermique entrée en vigueur dès 1974 qui fixe des contraintes énergétiques de plus en plus fortes. Ces contraintes se traduisent par le développement de systèmes et matériaux toujours plus performants mais aussi par la prise en compte de plus en plus de facteurs.

La conception d'un bâtiment est aujourd'hui le résultat d'un processus itératif guidé par l'expérience. Un bâtiment de référence est proposé et une étude paramétrique est réalisée afin de trouver une solution appropriée. Cependant l'amélioration de l'efficacité des bâtiments entraîne l'explosion de la combinatoire des solutions, alors que parallèlement, le temps disponible pour chaque appel d'offres reste identique. La conception d'une maison à énergie positive est donc un problème multi-critères où il est essentiel de trouver le bon équilibre entre qualité de l'enveloppe, coût de construction, et efficacité des équipements : un processus itératif n'est donc pas adapté. De plus, il existe des besoins non compressibles, comme la production d'eau chaude sanitaire ou l'augmentation croissante des besoins domestiques tel que l'électroménager.

Ainsi, afin de réduire la part anthropique responsable du réchauffement climatique, le respect du principe de sobriété n'est pas suffisant. Les énergies respectueuses de l'environnement tel que le solaire doivent se substituer aux énergies fossiles et nucléaires. L'énergie solaire est en effet disponible de manière presque illimitée et inonde chaque jour l'ensemble du globe terrestre. Elle apparaît ainsi comme une candidate de choix pour répondre à la fois aux besoins électriques et thermiques. Alors que le photovoltaïque est en pleine expansion, le solaire thermique subit une tendance négative notamment à cause d'un manque de compétitivité économique et à un encombrement important qui freine son développement.

À l'horizon 2020, avec la mise en place de maisons à énergie positive, le concepteur devra tenir compte de l'explosion de la combinatoire pour faire son choix. À travers ce document, il est donc proposé une approche tenant compte du principe de sobriété, où la majeure partie des besoins énergétiques de la maison individuelle sont couverts par un système solaire combiné. Contrairement aux approches actuellement utilisées, le bâtiment, les systèmes solaires (photovoltaïque et thermique), et la logique de contrôle, sont considérés comme un ensemble cohérent : le bâtiment et les systèmes solaires sont dimensionnés simultanément et fonctionnent de concert. La méthodologie développée est donc globale, multi-critères, et multi-objectifs et permet d'accompagner la prise de décision des

concepteurs lors de la construction d'une maison à énergie positive solaire. L'objectif de ces travaux est ainsi triple : valoriser le temps humain à travers un processus automatisé, améliorer l'exploration afin de proposer une large palette de solutions optimales pour la prise de décision, et, évaluer la faisabilité d'une maison à énergie positive couplée à un système solaire thermique.

Dans un premier temps, le contexte du réchauffement climatique est abordé, et les différentes initiatives présentées tant au niveau normatif que incitatif. La place de l'énergie solaire dans le bouquet énergétique et les différentes avancées technologiques comme réglementaires sont ensuite discutées afin de pouvoir proposer une méthodologie adaptée. Le second chapitre introduit les outils utilisés et le cas d'étude sélectionné à travers la description des scénarios retenus et du fonctionnement du système solaire. Une étude paramétrique est aussi réalisée afin d'évaluer le potentiel du couplage entre un système solaire et une maison à énergie positive. Fort de l'expérience acquise au cours des deux premiers chapitres, le troisième introduit la méthodologie d'aide à la décision retenue pour la conception de maisons solaires à énergie positive. Il y est notamment introduit des moyens permettant de réduire la complexité du problème, une approche d'optimisation permettant l'exploration du domaine de faisabilité, ou encore un outil interactif pour simplifier l'introduction des préférences pour le choix final. Le quatrième et dernier chapitre illustre la mise en place de la méthodologie d'aide à la décision développée à travers deux applications de conception de maisons à énergie positive. Ces deux conditions climatiques permettent de mettre en évidence la capacité de l'approche à proposer un large éventail de solutions optimales présentant des compromis différents en termes de performance du bâti et de dimensionnement des équipements solaires. Enfin, l'aide à la décision est illustrée par l'introduction de la préférence permettant de dégager des solutions à retenir.

LE SOLAIRE THERMIQUE APPLIQUÉ AU BÂTIMENT, UN PROBLÈME MULTI-OBJECTIFS

Ce chapitre décrit les objectifs et le contexte dans lequel ces travaux s'inscrivent. En effet le développement de maisons à énergie positive est l'aboutissement d'une volonté politique nécessaire pour répondre aux enjeux climatiques et économiques. Le solaire est lui, une énergie quasi-infinie pouvant se substituer aux énergies finies telles que le nucléaire ou les sources fossiles. Afin de proposer une méthodologie appropriée, il est dans un premier temps exposé le contexte climatique, l'importance du secteur du bâtiment, et plus particulièrement la place de la maison individuelle. Suit une description de la notion de maison à énergie positive et de la place et des avancées du solaire thermique et plus particulièrement des systèmes solaires combinés. Finalement en s'appuyant sur les travaux existants et les contraintes propres au contexte, il est proposé une méthodologie d'aide à la conception de maisons solaires à énergie positive adaptée.

I.1 Objectifs

Le bâtiment est le premier consommateur d'énergie (Déf. 1) en France et est donc un élément clé pour la réussite de la transition énergétique. Les nouveaux bâtiments doivent ainsi être performants et respectueux de l'environnement pour réduire la facture énergétique et le coût des rénovations futures. En effet, l'amélioration de la conception des bâtiments neufs se traduit par une amélioration du futur parc immobilier et donc par un allègement des coûts. Avec $\frac{3}{4}$ des consommations en énergie primaire, les ménages dont plus de 50 % sont des maisons individuelles se doivent d'être exemplaires. Le concept d'énergie positive n'a cependant pas de définition unique et son cadre d'application n'est pas encore clairement établi même si des initiatives nationales et internationales permettent d'y voir plus clair. Ces initiatives cherchent à répondre à la problématique du réchauffement climatique grâce à des mesures d'efficacité, de sobriété ou encore grâce aux énergies alternatives.

Définition 1 (Énergie)

*L'énergie en physique est la mesure de la capacité d'un système à produire de la chaleur, modifier un état, ou encore entraîner un mouvement. Dans notre problématique une distinction est nécessaire entre l'énergie dite **primaire** et l'énergie dite **finale**. L'énergie primaire correspond à l'énergie prélevée à l'environnement alors que l'énergie finale est l'énergie primaire après soustraction des pertes de stockage, de transport, et de transformation. L'énergie finale correspond ainsi à l'énergie consommée par l'utilisateur sans tenir compte des consommations engendrées pour sa production à l'opposée de l'énergie primaire. Le bouquet énergétique étant propre à chaque pays, les facteurs de conversion le sont eux aussi. Pour la France, les coefficients souvent admis sont définis en annexe (Tab. A.1).*

Parmi les solutions disponibles, l'énergie solaire apparaît comme un candidat de choix pour répondre aux problématiques de réchauffement climatique et à la forte croissance de la population. C'est une énergie propre, elle ne rejette pas de CO₂ dans l'atmosphère et permet de réduire la dépendance aux énergies fossiles et nucléaires. Un système solaire permet ainsi de répondre aux besoins d'une population grandissante sans pour autant polluer davantage. Abondante et inépuisable l'énergie solaire permet selon la technologie retenue de couvrir des besoins électriques (électroménager...) ou thermiques (chauffage...). Cependant bien qu'inépuisable l'énergie est uniquement disponible durant la période diurne et les systèmes doivent alors permettre de valoriser au mieux cette énergie en tenant compte de cette contrainte forte. Alors que le photovoltaïque profite d'une croissance forte avec l'augmentation des charges électriques, les systèmes solaires combinés (SSC) restent très minoritaires et sont principalement implémentés dans la rénovation.

Un SSC est un système permettant de couvrir la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) et les besoins en chauffage d'un bâtiment grâce l'énergie solaire. L'énergie solaire est récupérée par des capteurs puis, soit utilisée directement, soit stockée dans des ballons pour couvrir des besoins en période nocturne. Cependant ces systèmes comportent certains inconvénients responsables en partie de l'impopularité de la technologie. Ils nécessitent par exemple le recours à des ballons de taille importante qui augmentent le coût d'investissement. De plus bien souvent, la place disponible pour les équipements est réduite et le système doit être installé dans la zone chauffée. Ces choix techniques sont le résultat d'un dimensionnement basé uniquement sur l'expérience acquise à travers les installations plus anciennes. Pourtant les contraintes propres à la conception d'une Maison à Énergie POSitive (MEPOS) ne sont pas les mêmes que celle de constructions plus anciennes. Les bâtiments sont en effet aujourd'hui bien mieux isolés, les charges internes augmentent et deviennent majoritaires, les besoins de chauffage sont bien moins importants, mais les besoins en ECS restent eux sensiblement les mêmes.

Il est ainsi nécessaire de repenser la conception de SSC pour les Bâtiments à Énergie POSitive (BE-

POS). Se reposer uniquement sur l'expérience acquise apparaît comme un frein au développement de la technologie. Ces travaux cherchent ainsi à évaluer le potentiel d'un SSC adapté aux BEPOS. Inspiré par la norme européenne PREN 15603 actuellement en rédaction, une méthodologie d'aide à la décision est proposée afin d'aider à leurs conception. L'originalité de ces travaux réside principalement dans la prise en compte concomitante de la performance de l'enveloppe et du SSC permettant d'identifier des combinaisons pertinentes entre les équipements du SSC, la logique de contrôle, et l'enveloppe du bâti. Dans cette optique, une modélisation détaillée du système et de l'algorithme de contrôle est requis afin de pouvoir mieux comprendre les interactions existantes entre les deux. Le parti pris est le suivant : les contraintes techniques sont propres à chaque site, chaque industriel, mais aussi à chaque client dont les attentes varient fortement. Partant de ce constat, il apparaît plus intéressant de proposer un ensemble de solutions techniquement différentes mais répondant toutes aux contraintes de la MEPOS à travers une approche multi-objectifs.

Ce chapitre décrit le contexte global dans lequel se place ces travaux. Il est dans un premier temps présenté les enjeux liés au réchauffement climatique et à la pénurie des ressources pour une population en forte croissance. Puis il est introduit les initiatives à l'origine de la prise de conscience collective de l'impact destructeur lié à la sur- utilisation des énergies fossiles. Ce sont en effet ces actions qui sont à l'origine des textes réglementaires qui encadrent la rénovation et la conception des bâtiments. Cette volonté politique se traduit par le développement de bâtiment toujours plus performants sur le plan énergétique comme environnemental et aujourd'hui par la construction de BEPOS. La seconde partie de ce chapitre présente les différents travaux et initiatives à l'origine de ce projet. Elle met notamment en avant la complexité inhérente à la définition d'une base réglementaire internationale commune pourtant nécessaire pour répondre de manière durable aux problématiques énergétiques et environnementales. La troisième partie invite le lecteur à découvrir l'énergie solaire, comment elle est mesurée, récupérée, et les difficultés liées à son évaluation en particulier à cause des différences géométriques propres à chaque capteur. Il existe en effet de nombreuses technologies en solaire thermique permettant de valoriser soit en chaleur, soit en électricité, l'énergie solaire. Suit une description de l'évaluation de l'évolution du solaire thermique à différentes échelles. Finalement, les différents travaux de la littérature dans le domaine du solaire thermique et plus particulièrement pour les SSC sont discutés. Ces avancées sont utilisées pour proposer un SSC et une méthodologie adaptée à la conception de MEPOS solaires dont la démarche est discutée dans la dernière partie de ce chapitre.

I.2 L'Homme au centre d'un trouble climatologique

Comme explicité ci-avant l'énergie solaire est une alternative pertinente aux énergies non-renouvelables et apparaît donc comme pertinente pour répondre aux enjeux globaux liés au réchauffement climatique. Cette première section s'intéresse au contexte climatiques de manière globale et présente les différentes initiatives à l'origine de la prise de conscience de l'importance politique, économique, et environnemental d'un développement raisonné. La dernière partie discute plus en détail les actions françaises à l'échelle nationale, européenne, et internationale.

I.2.1 Le réchauffement climatique : origines et conséquences

Auparavant les différentes tâches étaient principalement réalisées soit en utilisant les éléments (vent, eau, feu) soit en utilisant la force animale (bœufs, chevaux...). Les révolutions industrielles marquent l'émergence des machines, la société passe alors d'une dominante artisanale et agraire à une société commerciale et industrielle affectant aussi bien l'agriculture que la politique ou l'économie.

Dès le début des années 90 le pétrole devient une source énergétique stratégique et est activement utilisé dans l'industrie. La tendance s'accélère après la seconde guerre mondiale, durant la période des 30 glorieuses, où la France et d'autres pays développés profitent d'une croissance forte tant au niveau économique, que démographique (baby-boom). Cette expansion est portée par un accès aisé aux énergies et particulièrement aux énergies fossiles principaux vecteur de développement de nos civilisations occidentales. Durant cette période marquée par le développement du capitalisme, une énergie bon marché considérée comme inépuisable, et un accroissement important de la population, la demande énergétique explose. Afin de pouvoir comparer les différentes énergies entre elles, une unité commune est retenue : la tonne équivalent pétrole (tep) ou tonnes of oil équivalent (toe) dans sa version anglophone qui équivaut au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole, soit 41,868 GJ. À titre de comparaison, l'énergie primaire consommée en 1973 était de 6101 Mtep dont 87 % en énergie fossile alors qu'elle est en 2014 à 13 699 Mtep pour une part de près de 81 % en énergie fossile (Fig. I.1). Cette énergie reste ainsi encore aujourd'hui fortement majoritaire même si la consommation du pétrole diminue.

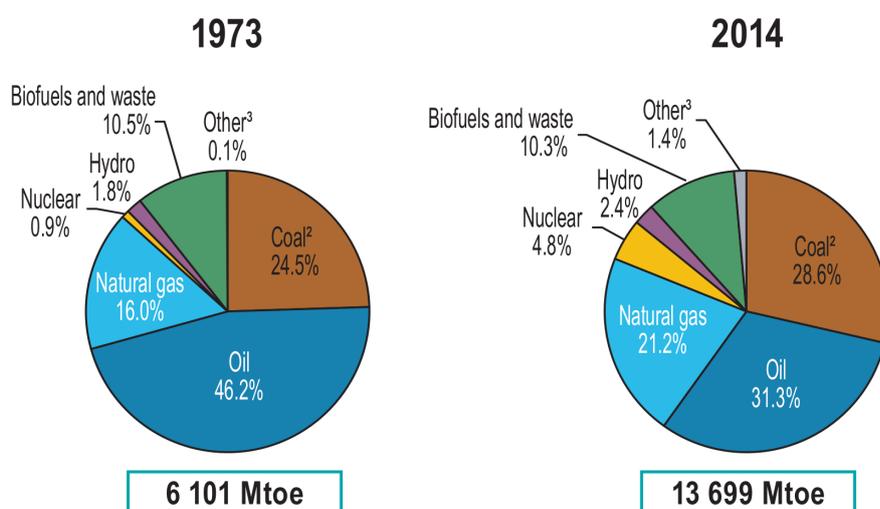


FIGURE I.1 – Répartition des sources de production en énergie primaire pour 1973 et 2014 d'après IEA (2016) (« other » comprend la géothermie, le solaire, et l'éolien).

Une fraction de cette énergie est utilisée pour le chauffage, la voiture, ou encore pour nos équipements électriques de plus en plus nombreux : 41 % entre 2010 et 2013 en France ADEME (2015). L'autre fraction moins visible représente l'énergie utilisée pour la production, le transport ou le stockage des biens de consommation de la vie courante. La sur-exploitation de ces énergies montre cependant des limites et impacte de manière importante l'environnement.

Les effets du réchauffement climatique sont aujourd'hui facilement observables et sont tels qu'ils bouleversent le fonctionnement de la planète. Bien que nous soyons en période de réchauffement (causes externes astronomiques) l'impact de l'être humain est aujourd'hui reconnu. La sur-utilisation des énergies fossiles couplée à une forte évolution démographique se traduit par de trop fortes émissions en Gaz dits « à Effet de Serre (Déf. 2) » (GES). Actuellement les mesures montrent un forçage radiatif excédentaire entraînant une lente augmentation de la température du sol terrestre. Entre 1750 et 2005, ce forçage est estimé à 2,63 W/m² dont 1,6 W/m² imputable aux émissions anthropiques (MYHRE et al. 2013, tableau 8.6). La température moyenne sur l'ensemble de la surface du globe étant le résultat du bilan radiatif entre le rayonnement solaire incident et le rayonnement infrarouge terrestre émis, elle augmente lorsque la part du rayonnement terrestre émis puis absorbé par l'atmosphère augmente. L'étude des émissions anthropiques peut être assimilée à l'étude des émissions néfastes additionnelles aux émissions naturelles. La vapeur d'eau qui contribue à 55 % à l'effet

de serre n'est donc pas considéré l'Homme n'a pas un impact direct sur sa concentration dans l'atmosphère. Dans des conditions normales l'effet de serre est en effet positif et permet de maintenir une température correcte pour le développement de la biodiversité : en son absence la température moyenne de la terre serait de -18°C . En conséquence, l'effet de serre additionnel est en majorité dû à la concentration de CO_2 avec 56,6 %, mais aussi au méthane (CH_4), au protoxyde d'azote (N_2O) et à l'ozone (O_3). Fig. I.2 met en évidence l'accélération des consommations à partir de 1950 qui se traduit par une forte augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

Définition 2 (Effet de serre)

C'est un phénomène naturel engendré par la présence de divers composés gazeux dans l'atmosphère. L'atmosphère ayant un faible indice de réflexion et d'absorption pour le rayonnement solaire (visible, proche UV et proche IR), une grande partie du rayonnement est transmise à la surface de la terre. Une fraction est alors absorbée alors qu'une autre est réfléchi et repart dans l'espace. La part absorbée engendre un échauffement, le sol émet alors un rayonnement dans le domaine de l'IR lointain. Certains composants gazeux de l'atmosphère étant faiblement transparents pour ce domaine d'émission, une partie de l'énergie est absorbée au lieu d'être rejetée dans l'espace : c'est le mécanisme d'effet de serre.

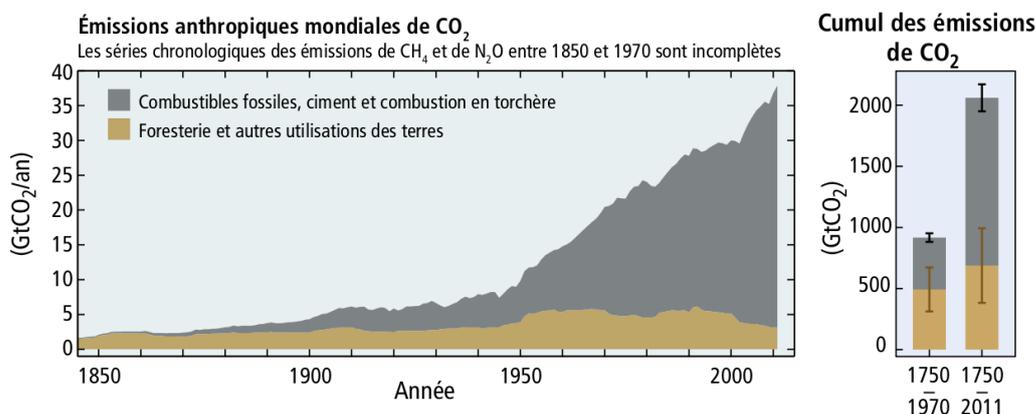


FIGURE I.2 – Évolution de la concentration anthropique mondiale en CO_2 au cours des derniers siècles (IPCC 2014).

L'activité humaine depuis la révolution industrielle amène aujourd'hui à un taux de concentration en GES jamais atteint depuis près de 800 000 ans (IPCC 2014). Bien que non imputables en totalité au réchauffement climatique, les événements extrêmes attribués au changement climatique sont de plus en plus nombreux et touchent l'ensemble des écosystèmes (IPCC 2014, Figure SPM.4). L'augmentation des occurrences de canicules, des fortes précipitations, ou l'élévation du niveau de la mer font notamment partie des conséquences directes (Fig. I.3). Lorsque seules les émissions naturelles sont considérées, les résultats de simulations mettent clairement en évidence une stagnation de la température moyenne. À l'inverse, les observations et simulations qui tiennent compte de la part anthropique montrent que l'énergie stockée dans les océans (OHC, Ocean Heat Content), la température des océans comme de la terre, ou encore, la fonte des glaces en Arctique sont imputables à l'être humain. Des mesures doivent ainsi être prises afin de limiter la consommation en énergie primaire et les émissions en GES. Le mode de développement actuel de l'être humain (transport, bâtiment, population, robotisation...) est aussi responsable de nombreux autres facteurs environnementaux aggravants, comme l'acidification des sols, la pollution de l'air, la réduction de la biodiversité... (BIERMANN et al. 2016). L'énergie étant cependant indispensable, seule une alternative respectueuse de l'environnement, les énergies renouvelables, permettront d'inverser la tendance.

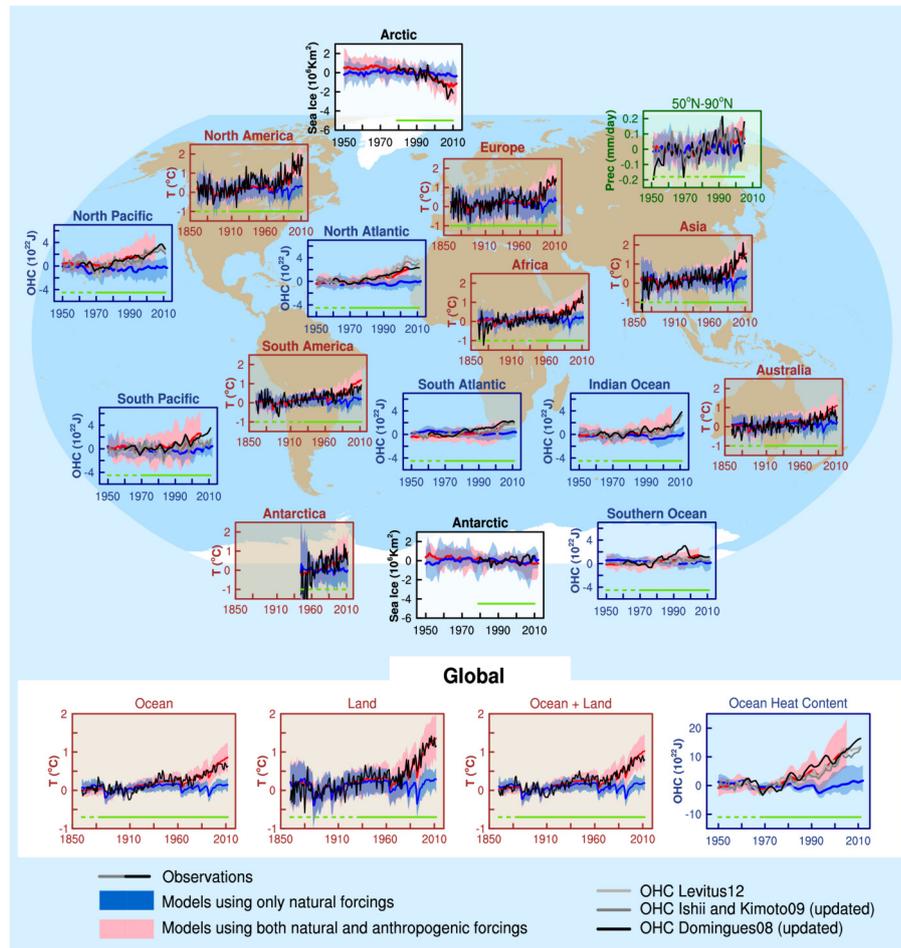


FIGURE I.3 – Mise en évidence des effets anthropiques globaux et à l'échelle de la région à travers l'évolution des température des océans et des terres, des précipitations, de l'énergie stockée dans les océans (OHC, Ocean Heat Content), et de la surface de mer gelée. Les lignes rouges et bleues foncées représentent l'évolution moyenne des différentes simulations respectivement avec et sans influence humaine. Les zones ombrée en bleu et rose représentent les intervalles de confiance pour les différentes simulations. Finalement les lignes de teintes grises décrivent les observations de différents travaux (ACHUTARAO et al. 2013).

I.2.2 Vers une prise de conscience collective

En 1970, le club de Rome commande le rapport Meadows « Halte à la croissance ? » (MEADOWS et al. 1972). Pour la première fois, la possibilité d'une pénurie des ressources énergétiques est envisagée par des chercheurs du MIT à travers plusieurs scénarios plus ou moins catastrophiques. Ce rapport fut la première pierre nécessaire à la construction d'une prise de conscience commune de l'impact nocif de l'Homme sur l'environnement et des problèmes qu'il engendre : destruction de la couche d'ozone, déchets, bouleversement climatiques, pollution de l'eau, atteintes à la bio-diversité... En 1987 un nouveau rapport cette fois commandité par les Nations Unies, « Notre avenir à tous », plus connu sous le nom de rapport *Brundtland* (BRUNDTLAND et AHALID 1987). Contrairement au rapport *Meadows* qui présente des scénarios de ce qui pourrait arriver si rien ne change, ce document pose les bases pour un développement équitable mettant en avant la protection des ressources naturelles mais aussi de l'équité des individus face aux ressources. Le terme « Développement durable » (Fig. I.4a, aujourd'hui largement repris, est introduit :

« Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. »

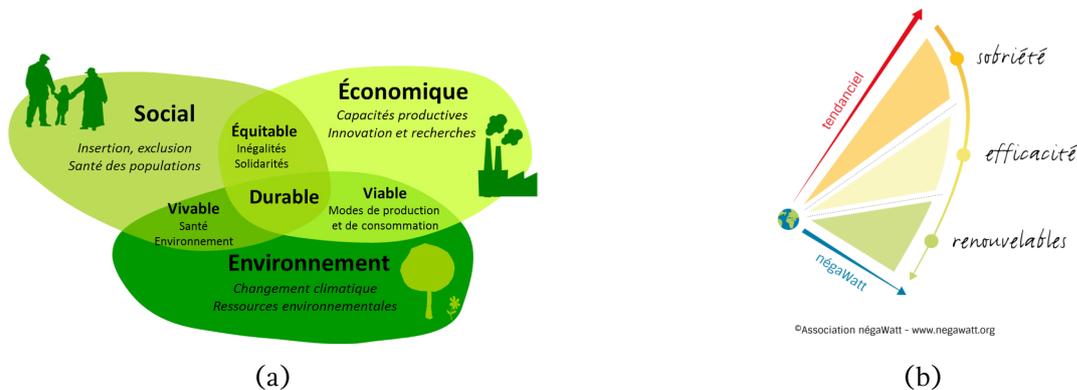


FIGURE I.4 – Principe du développement durable¹(a). Principe du scénario *négaWatt* (b) (SALOMON et al. 2012).

Les décisions politiques étant étroitement liées aux résultats scientifiques, une organisation indépendante a été créée en 1988 par l'Organisation des Nations Unies (ONU) afin de fournir une base scientifique solide. Cette organisation connue sous le nom de Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), regroupe des experts en climatologie dont le but est d'apporter un regard critique sur les travaux provenant de différents groupes de recherche scientifiques, techniques, et socio-économiques. Il a pour but, la réalisation sans parti-pris de l'expertise des risques liés au réchauffement climatique et de faire re-sortir les informations et découvertes faisant consensus dans la communauté scientifique. Grâce à ces publications périodiques, les connaissances accumulées sur le sujet permettent de sensibiliser le public non expert, élément indispensable pour que des engagements politiques soient pris.

Peu de temps après, au 3^{ème} Sommet de la Terre se tenant à Rio en 1992, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC²) est adoptée. Cette convention développe un plan d'action pour le 21^{ème} siècle, l'Agenda 21 mais aussi 27 principes pour sa mise en œuvre. Les domaines traités sont très variés et couvrent par exemple la pauvreté, la gestion des ressources notamment en eau, des déchets, mais aussi la pollution ou l'agriculture... Elle est ensuite complétée par un accord visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) lors de la 3^{ème} Conférence des Parties (COP, Conference Of Parties) à Kyoto (1997) avec une entrée en vigueur début 2005. La CCNUCC est aujourd'hui ratifiée par 197 pays montrant l'intérêt des questions du développement durable sur le plan international. Pour la première fois, en 2006, le *rapport Stern* (STERN 2006) commandé par le gouvernement britannique décrit l'impact économique d'une inaction face aux problèmes du réchauffement climatique. Précédemment mis en avant par des scientifiques, la sonnette d'alarme est ici tirée par un économiste. Le réchauffement impacte en effet directement les composantes essentielles de notre mode de vie : l'accès à la santé, à la nourriture ou encore à l'eau. Il est alors suggéré un effort de recherche et une coopération technique au niveau international afin de répondre à la problématique de manière efficace. Il est aussi mis en avant la nécessité pour les pays riches, principaux responsables du réchauffement climatique, d'aider au développement des pays plus pauvres dans des conditions respectueuses de l'environnement.

Dès 2007, gouvernements et chefs d'états de l'Union Européenne (EU) définissent des objectifs globaux pour 2020. Ces objectifs sont au cœur du *paquet climat-énergie*³ et engagent l'Europe à réduire de 20 % (par rapport à 1990) ces émissions de GES, à améliorer de 20 % l'efficacité énergétique, et à couvrir 20 % de la consommation finale par des énergies renouvelables (EnR). Au niveau international, la 21^{ème} COP (2016) a permis d'aller encore plus loin avec l'acceptation de la mise en place de

1. <http://www.cdcmortainais.fr>

2. http://unfccc.int/essential_background/convention/status_of_ratification/items/2631.php

3. <http://www.assemblee-nationale.fr/13/europe/rap-info/i1260.asp>

mesures pour la réduction des émissions de GES avec notamment l'objectif de contenir le réchauffement climatique en dessous des 2° (réalisation du plan facteur 4) À terme, le respect de la trajectoire permettra d'atteindre la « neutralité carbone » en compensant les émissions de GES dans la seconde moitié du siècle. Contrairement au précédent accord (*Accords de Kyoto*), le parti-pris est ici d'imposer une transparence entre les différents signataires. Chaque signataire doit ainsi rendre compte régulièrement des objectifs et évolutions réalisées, informations qui seront disponibles publiquement afin d'inciter à l'exemplarité. Ancrées d'une forte symbolique et marquant un pas important vers un développement plus durable, aucune prise de mesure n'est cependant obligatoire et la sobriété énergétique n'est pas mentionnée.

Le cas français

En France, l'engagement « facteur 4 » (2003) et le paquet climat-énergie défini au niveau européen sont repris dans les objectifs des lois *Grenelle I et II* (GRENELLE 2010). Ce texte traduit pour la France une volonté de décisions sur le long terme à la fois sur le plan sociétal, politique, et économique, même si la question du nucléaire n'est pas encore à l'ordre du jour. Ces lois marquent le premier pas vers une démarche responsable sur les transports, la santé, l'énergie ou encore la préservation de la bio-diversité comme notamment la labellisation de l'agriculture *BIO* ou la réduction de la précarité énergétique des foyers. Ces mesures s'appuient notamment sur le plan de transition énergétique proposé par l'association *négaWatt* (SALOMON et al. 2012).

NégaWatt est une association française qui développe depuis 2003 un scénario de transition énergétique permettant à l'horizon 2050 de couvrir les besoins énergétiques à 100 % grâce aux énergies renouvelables : biomasse, éolien, solaire (NÉGAWATT 2017). La trajectoire proposée suit trois axes principaux (Fig. I.4b) : plus de sobriété, améliorer l'efficacité énergétique, promouvoir les énergies renouvelables. L'association regroupe dans cet objectif, des experts du domaine de l'énergie, des économistes, des sociologues..., et tient compte des données statistiques sur des domaines multiples comme l'évolution démographique, la consommation des foyers, le coût des énergies... La sobriété élément clé du scénario invite à repenser son mode de vie et propose ainsi à la fois une transition énergétique mais aussi comportemental basé sur un principe simple à l'origine du mot *negawatt* :

« L'énergie qui pollue le moins est celle que l'on ne consomme pas. »

Parmi les nombreuses mesures concrètes proposées, il peut être cité, l'amélioration des transports en commun, la réduction des dépenses électriques inutiles, l'isolation du bâti existant, l'économie circulaire, ou encore un programme de sortie progressive du nucléaire pour 2035.

Depuis 2012, au niveau de l'agriculture et donc de l'accès à la nourriture, le scénario *négaWatt* est complété par le scénario *Afterres2050* développé par l'ONG *Solagro*. Ce scénario s'intéresse principalement à la gestion des forêts, la biodiversité, ou encore les terres agricoles afin de nourrir de manière durable la population française. Le scénario met notamment en avant le fait que le respect du facteur 4 couplé à une alimentation et une agriculture plus raisonnée permettrait de couvrir les besoins alimentaires de l'ensemble des français. S'appuyant sur le principe de sobriété, le scénario indique aussi qu'une réduction par deux de la consommation de viande est nécessaire afin d'une part de réduire les émissions de gaz à effet de serre mais aussi afin de libérer des terres pour la production de biomasse. Le travail de ces associations est rapidement reconnu et s'inscrit en 2015 dans le cadre de la Loi pour la Transition Énergétique et la Croissance Verte (LTECV⁴) comme un des scénarios de maîtrise de l'énergie au côté du scénario de l'ADEME basé sur l'efficacité, du scénario ANCRE basé sur la diversité des énergies, et du scénario *Négatep* basé sur la dé-carbonisation. La loi décrit ainsi de nombreux engagements visant à réduire l'impact de l'homme sur le climat, créer de l'emploi pour

4. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385>

une population grandissante, mais aussi réduire la précarité avec un plan de rénovation du patrimoine bâti. Des engagements forts sont ainsi pris au niveau énergétique et environnemental pour 2030 :

- réduire de 40 % (par rapport à 1990) les émissions des gaz à effet de serre et par quatre à l'horizon 2050.
- réduire la consommation en énergie finale de 20 % (par rapport à 2012) et de 50 % pour 2050.
- réduire de 30 % la consommation en énergie primaire.
- porter à 32 % la part des EnR sur la consommation finale brute.
- réduire la dépendance à l'énergie nucléaire pour la production d'électricité à 50 % évaluée à 77 %⁵ en 2014

La définition du contexte général met en exergue la nécessité de réduire la consommation mondiale et de couvrir les consommations restantes avec des énergies renouvelables. Dans cet optique, ces travaux cherchent à développer une méthodologie permettant d'aider au développement de bâtiments où la consommation en énergie non-renouvelable est minimale. L'énergie solaire est substituée aux énergies non-renouvelables pour couvrir les besoins d'un bâtiment à faible consommation grâce à un SSC et à une production photovoltaïque permettant de couvrir les besoins thermiques et électriques du bâtiment. La méthodologie s'appuie sur le concept de BEPOS et en particulier sur le cadre normatif européen en construction où le principe de sobriété est mis en avant. Le concept de BEPOS étant complexe et sa définition est le résultat de nombreux travaux au niveau international, européen, et national décrits dans la section suivante.

I.3 Vers le bâtiment à énergie positive

Représentant la majeure partie des consommations en énergie dans le monde, le secteur du bâtiment a un rôle déterminant à jouer dans le respect des engagements politiques. Dans cette optique la réglementation thermique s'est renforcée au fur et mesure des années. En 2020, la réglementation imposera le concept de BEPOS pour toutes nouvelles constructions. Pour accompagner les concepteurs dans cette tâche difficile, ces travaux proposent le développement d'une méthodologie d'aide à la décision en s'appuyant sur le concept de BEPOS et particulièrement sur le cadre européen (PREN 15603) qui sera traduit au niveau national dans la future réglementation. Les nouveaux bâtiments devront avoir une enveloppe performante, produire autant d'énergie primaire que consommée sur site (bilan positif), et une part importante des consommations devra être couverte par des énergies renouvelables produites *localement*. Ainsi couplée à une enveloppe performante, le solaire est une solution pertinente : les besoins thermiques pouvant être couverts par un SSC et les besoins électriques par un système photovoltaïque.

Cette section introduit ainsi l'évolution réglementaire à l'origine du concept de BEPOS. Suit un descriptif des travaux existants au niveau international, européens, et français.

I.3.1 Un long chemin déjà parcouru

En France selon ADEME (2015), le secteur du bâtiment est responsable à 45 % des consommations en énergie finale devant les transports (33 %) et l'industrie (19 %) (Fig. I.5a). C'est de plus le troisième secteur le plus polluant avec 20 % des émissions en CO₂(eq) derrière l'industrie (30 %) et les transports (28 %).

C'est suite au premier choc pétrolier de 1973 que la France met en place en 1974 la première Réglementation Thermique (RT) afin de faire face aux dépenses énergétiques importantes dans le secteur

5. <http://tinyurl.com/y7ujs7dn>

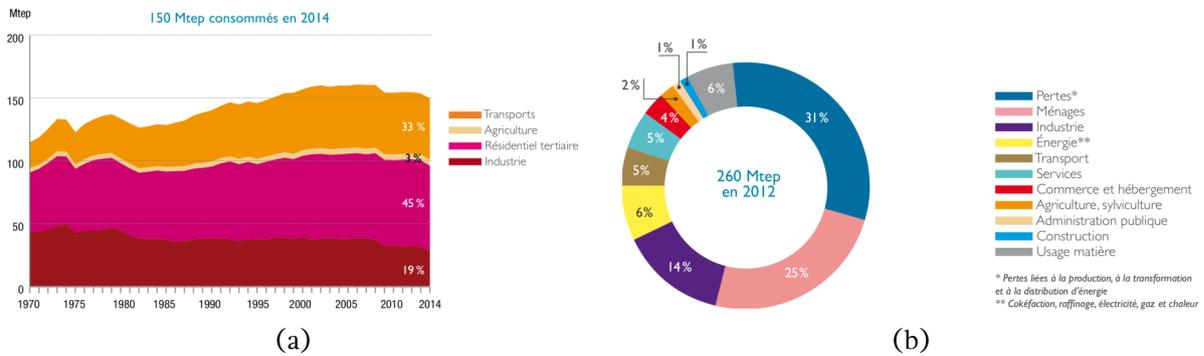


FIGURE I.5 – Évolution de la consommation française en énergie finale (a) et répartition de la consommation française en énergie primaire en 2012 (b) d'après ADEME (2015).

du bâtiment. L'énergie qui hier semblait inépuisable apparaît alors comme une ressource limitée et la sécurité de l'approvisionnement devient une préoccupation nationale. D'après l'ADEME, la consommation annuelle en énergie finale est alors de l'ordre de 370 kWh/m^2 dans le secteur du résidentiel et la réglementation fixe un objectif de réduction de la consommation de 25 %. Une méthodologie de calcul commune est aussi mise en place et un contrôle régulier des systèmes de chauffage comme de climatisation imposée. Cette réglementation évolue ensuite en 1982, 1989, puis 2000 portée par les différents acteurs du secteur du bâtiment.

Dans une approche volontariste, les états européens adoptent en 2002, la directive sur la performance énergétique des bâtiments (2002/91/EC, EUROPÉEN et EUROPÉENNE 2002) qui fut à l'origine d'avancées significatives pour tous les états membres avec notamment la mise en place des diagnostics de performance énergétique (DPE), des valeurs seuils et une méthodologie commune pour évaluer la performance énergétique des bâtiments, le contrôle régulier des chaudières (10 kW) et un effort de normalisation commun par le Comité Européen de Normalisation (CEN). Ces engagements ont été traduits par la plupart des pays membres dans leur RT propre comme la France à travers les dispositions des lois Grenelle et les RT 2005. Mise en application en 2006, elle marque de nombreuses avancées réglementaires notamment avec l'introduction du concept de bâtiment de référence. Chaque bâtiment est ainsi évalué par rapport à la référence et des garde-fous sont mis en place afin d'éviter les incohérences énergétiques. Ces mesures incitatives sont aussi à l'origine de la publication dans le journal officiel en mai 2007 de l'arrêté encadrant l'obtention d'un label HPE qui permet de valoriser un bâtiment obtenant un niveau de performance globale supérieur à la RT. Le label comporte cinq niveaux dont le plus performant, le label Bâtiment à Basse Consommation (BBC-2005⁶) est inspiré du label Suisse *Minergie*. Pour la première fois en France, un label d'excellence énergétique est proposé et impose une consommation en énergie primaire sur le chauffage, la production d'ECS, le refroidissement, et l'éclairage à 50 kWh/m^2 (modulé en fonction des conditions géographiques). La mise en place de ce label a permis aux professionnels de s'adapter aux contraintes énergétiques fortes qui seront reprises dans la réglementation actuellement en vigueur, la RT 2012. En effet le passage à la RT 2012 impose aux bâtiments une consommation maximale ($C_{ep} \text{ max}$) réduite de moitié. De plus le nouveau seuil tient aussi compte de l'éclairage et des auxiliaires alors que dans la RT 2005, le $C_{ep} \text{ max}$ est défini uniquement pour le chauffage, la production d'ECS, et le refroidissement. Les travaux se concentrent aujourd'hui sur la préparation de la RT 2020, qui devra permettre d'honorer les engagements européens et se rapprocher des objectifs internationaux pour 2030 et 2050.

6. <https://www.effinergie.org/web/index.php/les-labels-effinergie/bbc-effinergie>

La place de la maison individuelle

Si on considère uniquement le parc résidentiel, la consommation moyenne est de $186 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2$ en 2012 dont 67 % due au chauffage. Les ménages représentent ainsi 25 % des consommations en énergie primaire (Fig. I.5b). Finalement malgré une réduction de la consommation moyenne des logements jusqu'en 2006, la consommation augmente entre 2002 et 2012. Il est donc important de faire des économies d'énergie dans le bâtiment et en particulier dans le résidentiel afin d'une part de respecter les engagements mais aussi réduire la facture énergétique. D'après l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) la maison individuelle représente en 2016 56 % des 35 millions de logements en France. Rénover le patrimoine existant est la mesure la plus importante afin de réduire les consommations en énergie fossile, réduire notre dépendance à l'énergie nucléaire, et limiter les émissions de GES. Il est cependant important de continuer à innover dans le neuf et par extension dans la maison individuelle. Malgré une diminution en faveur des habitats collectifs depuis 2008, la maison individuelle représente en effet près de 200 000 nouveaux chantiers terminés par an, dont $\frac{3}{4}$ de maisons individuelles pures (CAICEDO et al. 2015). Ainsi les nouvelles constructions de maisons individuelles se doivent d'être innovantes énergétiquement afin de réduire le coût des rénovations futures. C'est dans cette optique que le concept de BEPOS a été développé.

I.3.2 Description générale du concept de BEPOS

Bien qu'il n'existe pas encore de cadre réglementaire en France, la directive européenne 2010/31/EU (EUROPÉEN et EUROPÉENE 2010) (mise à jour de EUROPÉEN et EUROPÉENE (2002)) décrit un programme commun pour les pays de l'EU. Elle introduit le concept « nearly Zero Energy Buildings » (*nearly ZEB*) incitant chaque état membre à mettre en œuvre une politique permettant d'atteindre pour tous les bâtiments neufs une consommation énergétique en énergie primaire « quasi nulle » en 2018 pour les bâtiments publics et en 2020 pour le privé (article 2 et 9).

En France cette initiative prend le nom de Bâtiment à Énergie POSitive (BEPOS), indiquant que le bâtiment produit plus qu'il ne consomme; définition à laquelle la directive ajoute les contraintes suivantes :

- Les bilans énergétiques doivent être réalisés en énergie primaire
- La consommation doit être couverte par des sources d'énergies renouvelables
- La production doit être réalisée localement

Le concept reste ainsi fortement interprétable et aucune indication concrète permettant d'atteindre ces objectifs n'est pour le moment fournie. Pour cette raison, de nombreuses définitions ont été développées au sein du globe, si bien que la commission européenne a mandaté une expertise permettant de classer ou tout du moins d'identifier les différences (ECOFYS et al. 2013). En effet, chaque pays porte ses propres convictions, sa propre culture du bâtiment et de la construction, sa propre politique, son propre mix énergétique, ses propres contraintes d'accès à l'énergie, et bien sûr son propre climat. Au final le rapport suggère l'élaboration de près de 75 définitions différentes et soulève de nombreux questionnements sur la bonne manière de procéder. Afin de pouvoir proposer des solutions techniques et technologiques innovantes mais atteignable pour 2020 des initiatives au niveau national, européen, et international voient le jour. Ces initiatives s'appuient en partie sur les retours d'expériences et l'analyse de bâtiments performants et permettent de définir un cadre international.

I.3.3 La complexité de la définition d'un cadre international

Au niveau international le BEPOS connu sous l'acronyme ZEB a fait l'objet d'un travail important et novateur. Le concept est né en réponse aux problématiques climatiques et la nécessité de repenser

la manière de construire les bâtiments qui représente aux États-Unies 40 % de la consommation en énergie primaire et plus de 70 % de la consommation électrique (TORCELLINI et CRAWLEY 2006). Il restait alors à définir un concept commun et fournir les éléments aidant à sa mise en place. En effet même si l'idée fait consensus, il restait encore à définir les indicateurs à retenir ou encore l'adéquation entre besoins et demande. Il est aussi nécessaire de définir les frontières, comme par exemple le terme « locale », la période considérée pour son évaluation, ou les flux considérés. Ces questions sont traitées dans le cadre de la tâche 40 (« Net Zero Energy Solar Buildings ») et de l'annexe 52 de l'ECBCS (« Towards Net Zero Energy Solar Buildings ») portées par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) (ATHIENITIS et O'BRIEN 2015). Les travaux se focalisent sur la définition d'un BEPOS connecté (*Net ZEB*, Net Zero Energy Building) où la production renouvelable alimentant le réseau permet d'équilibrer les consommations du bâtiment. À l'horizon 2011, les nombreux travaux et maisons de démonstration permettent d'alimenter les différentes bases de données et de nombreuses méthodes sont identifiées (A.J. et al. 2011).

Le choix des indicateurs

Afin de pouvoir évaluer le caractère positif d'un bâtiment, il est dans un premier temps nécessaire de définir un système d'unité, un indicateur suivant lequel s'appuyer. TORCELLINI et al. (2006) propose quatre indicateurs permettant d'approcher de manière différente le concept de *Net ZEB* :

« **Net Zero Site Energy** » : La production renouvelable sur site doit pouvoir compenser la consommation finale du bâtiment.

« **Net Zero Source Energy** » : La production renouvelable transmise au réseau doit permettre de compenser la consommation primaire du bâtiment.

« **Net Zero Energy Costs** » : Le gain d'argent engendré par la vente de la production locale compense au minimum la consommation achetée.

« **Net Zero Energy Emissions** » : La part renouvelable doit être assez importante pour couvrir les émissions engendrés par la consommation non renouvelable telles que les énergies fossiles.

L'auteur met aussi en avant les avantages et limites de chaque approche. Le choix de l'énergie primaire permet d'avoir une cohérence internationale mais apporte une complexité liée aux facteurs de conversion propres à chaque bouquet énergétique. Le calcul selon les émissions est plus complexe car il faut définir quels critères retenir parmi les nombreux critères disponibles : émissions de GES, énergie grise, déchets radioactifs ... L'utilisation de l'énergie finale ou du coût permet de simplifier sa mise en place mais met au même niveau l'ensemble des moyens de production. L'approche utilisant l'énergie primaire ressort de la comparaison comme étant l'indicateur le plus utilisé mais certaines approches cumulent les indicateurs comme le traduit en France les différents labels décrits ci-avant.

La méthodologie de calcul

Le bilan du bâtiment sur l'indicateur retenu doit permettre d'obtenir à minima un équilibre entre l'énergie exportée vers le réseau (production) et l'énergie importée par le bâtiment (consommation). Les coefficients utilisés pour réaliser ce bilan sont souvent considérés symétriques, l'énergie exportée vers le réseau représente autant d'énergie non renouvelable évitée qui aurait été nécessaire pour sa production. Cette affirmation est cependant uniquement valide lorsque l'énergie exportée ne nécessite pas la consommation d'énergie supplémentaire (SARTORI et al. 2012). En effet l'ajout par exemple d'un système photovoltaïque entraîne une consommation d'énergie grise pour son installation et son

entretien. L'auteur décrit une approche asymétrique par pondération et explique que sa mise en place résulte d'une volonté politico-économique. Par exemple, en France, afin de favoriser l'adoption des énergies nouvelles, l'énergie produite sur site est revendue plus chère que celle achetée. L'approche la plus courante cherche à évaluer le bilan énergétique sur une fréquence annuelle même si certaines approches calculent les indicateurs sur la durée de vie complète du bâtiment afin de tenir compte de son vrai impact environnemental (Voss et al. 2011).

SARTORI et al. (2012) proposent trois types de bilan (Fig. I.6) :

- charge / production (« load generation balance »)
- importation / exportation (« import/export balance »)
- mensuel (« monthly net balance »)

Le bilan *charge / production* est défini sur une base annuelle et tient compte des interactions entre le bâtiment et le réseau mais nécessite pour ce faire un pas de simulation faible afin d'estimer l'autoconsommation. Le choix d'un pas de temps plus réduit induit l'estimation plus précise du comportement des occupants à travers les consommations électro-domestiques ou le puisage en ECS. Dans la seconde approche, équilibre *importation / exportation*, les énergies respectives de chaque côté du bilan sont dans un premier temps pondérées par leurs coefficients respectifs puis sommées. Ainsi, l'ensemble de la production est exportée vers le réseau et l'ensemble de la consommation est fournie par le réseau. La seconde approche est ainsi plus simple à mettre en place, expliquant son adoption par un plus grand nombre de méthodologies. La première approche peut cependant être retenue expérimentalement sur les maisons pilotes et donner de précieuses informations. Finalement le dernier bilan proposé est *mensuel* et permet de mieux évaluer l'équilibre ou le déséquilibre existant entre la production et la consommation soulevant la question de l'adéquation entre production et consommation qui est discutée après avoir établi un cadre clair des frontières du bilan.

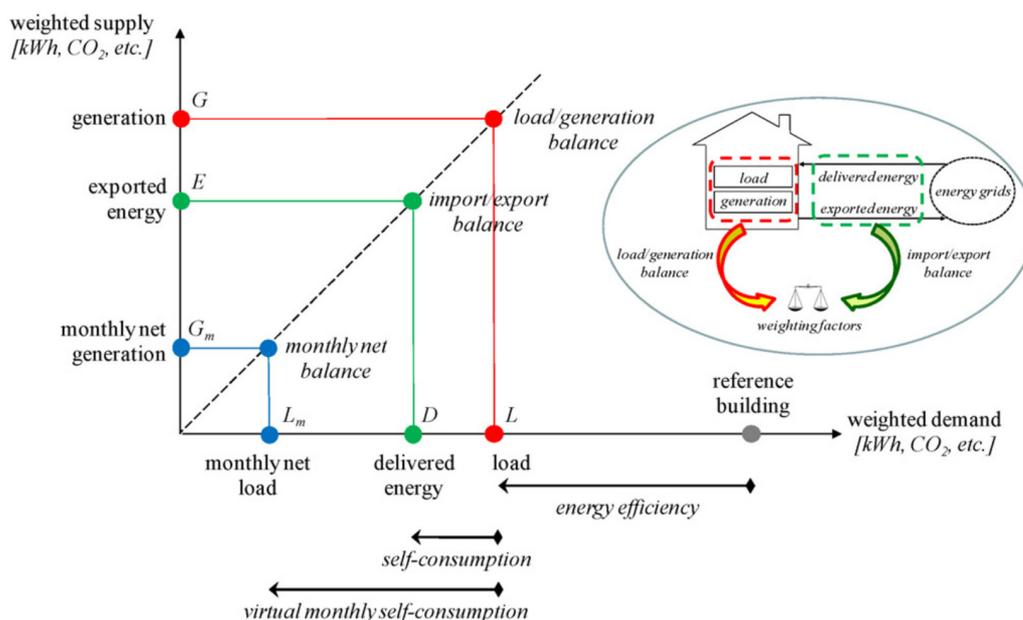


FIGURE I.6 – Représentation schématique de trois méthodes utilisées pour faire le bilan d'un Net ZEB selon SARTORI et al. (2012).

SARTORI et al. (2010) mettent aussi en avant la question des données météorologiques et en particulier l'utilisation de fichiers typiques construits sur la connaissance du passé. ROBERT et KUMMERT (2012) montrent qu'il est possible grâce à une technique de morphing (BELCHER et al. 2005) de générer des fichiers tenant compte des prévisions climatiques afin de simuler le temps de demain et non celui d'hier.

Les frontières considérées

Frontières physiques La définition d'un ZEB implique un bilan positif grâce à une production dite « locale » dont le périmètre physique reste à définir. TORCELLINI et al. (2006) proposent pour la définition d'un ZEB de favoriser dans un premier temps les solutions permettant de réduire les consommations comme l'isolation ou l'efficacité des systèmes. Dans un second temps, les solutions favorisant la production d'énergie renouvelable locale (« On-Site »), et enfin l'utilisation de sources extérieures (« Off-Site »). Au niveau du site, une distinction est faite entre la production *sur* le bâtiment et *au* niveau de la parcelle détenue par le propriétaire avec une préférence pour le premier. Au niveau des sources extérieures, l'utilisation de la bio-énergie est favorisée et le recours au réseau apparaît comme la dernière option. MARSZAL et al. (2010) proposent une représentation graphique où est identifié le périmètre physique sans pour autant mettre en avant un quelconque classement de préférence. Il ajoute aussi une distinction supplémentaire au niveau des ressources extérieures au site en séparant l'investissement du propriétaire dans un site extérieur pour produire de l'énergie renouvelable, et le recours au réseau.

Les usages : La définition d'un BEPOS met en avant l'utilisation d'énergies renouvelables afin de compenser les consommations sur site. Uniquement chercher à obtenir un bilan positif apparaît cependant comme une solution limitée excluant les systèmes de cogénération qui sont pourtant des solutions qui permettent de maximiser l'utilisation des énergies non renouvelables (SARTORI et al. 2010). A.J. et al. (2011) mettent aussi en exergue la diversité observée sur les usages considérés pour le calcul des indicateurs. Les approches les plus anciennes ne considèrent que les principaux usages : chauffage et production d'ECS alors que d'autres plus récentes tiennent aussi compte de l'éclairage, du refroidissement, et des auxiliaires. La diminution des usages courants met en aussi sur le devant de la scène les autres usages auparavant négligés comme les consommations électro-domestiques.

Adéquation temporelle avec le réseau :

Un *Net ZEB* est par définition connecté au réseau, cependant, l'obtention d'un bilan positif au niveau annuel ne permet pas d'assurer la symétrie des échanges sur toute l'année. En effet, la production d'énergie renouvelable est en majorité assurée par une production photovoltaïque dont les pics de production en période estivale ne sont pas en adéquation avec la forte demande énergétique en période hivernale. La difficulté réside ainsi dans la gestion des pointes de consommation (hiver), des excédents de production (été), et de la non-continuité de la production renouvelable (éolien, photovoltaïque). Cette mutation dans le bouquet énergétique a donc imposé le développement des « Smart Grid » ou réseaux intelligents afin de répondre aux problèmes d'intermittence des principales sources d'énergies renouvelables actuellement utilisées pour générer de l'électricité. Des indicateurs ont alors été développés afin d'évaluer l'adéquation entre le bâtiment et le réseau. Voss et al. (2010) font la différence entre les interactions au niveau du bâtiment (« load matching ») ou entre le bâtiment et le réseau (« grid interaction »). La première famille d'indicateurs permet d'évaluer le niveau de concomitance entre la demande du bâtiment et la production sur site. La seconde permet d'évaluer la correspondance temporelle entre exportation du bâtiment et besoins au niveau du réseau. Une référence complète des différents indicateurs trouvés dans la littérature est proposée par SALOM et al. (2011) puis intégrée dans les travaux de l'annexe 52 (SALOM et al. 2014).

Mesures et vérifications :

Dans le cadre de la sous tâche A (NORIS et al. 2013), le monitoring apparaît comme indispensable afin de vérifier par la mesure la performance du bâtiment en la confrontant aux résultats de simulation. Il est recommandé à minima de vérifier le respect du bilan positif qui est le concept central

des BEPOS. Bien que ne faisant pas partie de la définition du concept, un *Net ZEB* doit avant tout être agréable à vivre. Dans cette optique le confort intérieur des occupants doit être analysé à travers une étude de Qualité de l'Air Intérieur (QAI) permettant de s'assurer que la performance du bâtiment n'est pas obtenue en sacrifiant le bien être des occupants. Un *Net ZEB* étant par définition connecté, l'adéquation du bâtiment avec le réseau est aussi une des principales recommandations. Finalement, le rapport présente une procédure standardisée mettant en avant différentes échelles de suivi du bâtiment ainsi qu'un outil d'analyse facilitant la comparaison des divers projets entre eux.

I.3.4 L'approche européenne

Au niveau européen, les exigences pour 2020 sont décrites à travers la directive 2010/31/EU (EUROPÉEN et EUROPÉENE 2010) qui esquisse la direction générale à prendre pour parvenir aux *nearly ZEB*. Afin de faciliter l'application de la directive, la commission européenne a mandaté le Comité Européen de Normalisation (CEN) pour la rédaction d'un cadre normatif : PREN 15603 (CEN 2013). La norme décrit une définition flexible, et claire de la *nearly ZEB* afin d'inciter les professionnels au développement de solutions innovantes mais doit aussi être suffisamment générique afin de permettre sa traduction au niveau national par les différents états membres (ZIRNGIBL 2014).

Les frontières considérées

La directive 2010/31/EU considère que la part de la production considérée dans le calcul du bilan énergétique doit être sur site (« on-site ») ou à proximité (« nearby »). Les travaux du CEN ajoutent une description plus précise du périmètre en explicitant ces deux termes. La production sur site considère uniquement le terrain où est localisé le bâtiment, alors que la production à proximité intègre les sources locales à l'échelle du quartier autorisant ainsi la mutualisation des productions en énergies renouvelables. La condition requise étant d'avoir une connexion dédiée et un équipement spécifique caractérisant ce lien afin de pouvoir calculer des coefficients de conversion en énergie primaire pour expliciter ce lien au niveau énergétique.

La méthodologie retenue

Un *nearly ZEB* est un bâtiment dont les consommations sur les cinq usages (chauffage, ECS, éclairage, auxiliaires, et refroidissement) sont très faibles et doivent être couverts par une production locale en énergie renouvelable. Le CEN propose une méthodologie sur quatre axes permettant de couvrir de manière précise la définition point par point.

Le premier axe permet l'évaluation des besoins à travers l'analyse de la qualité de l'enveloppe et du partitionnement du bâtiment : isolation, inertie, qualité de l'air, et conception bioclimatique. L'approche est ainsi similaire au calcul du B_{bio} décrit dans la RT 2012. Le second axe permet d'évaluer la performance du bâtiment et de ses systèmes à travers les cinq usages. Un total en énergie primaire est retenu afin de tenir compte de l'ensemble des pertes dues à l'acheminement, la transformation, et le stockage de manière équitable pour toutes les énergies. Le troisième axe est défini afin d'évaluer la proportion d'énergie renouvelable sur site en séparant le calcul pour chaque vecteur énergétique. L'indicateur proposé est le « Renewable Energy Ratio » (RER) défini comme le rapport entre la consommation en énergie primaire et la consommation en énergie primaire non renouvelable. Chaque usage étant séparé, la production des capteurs PV par exemple ne peut donc pas compenser le chauffage couvert par une chaudière au gaz. Finalement le dernier axe vérifie la performance globale du bâtiment en réalisant le bilan entre les énergies importées et exportées. Le bilan étant réalisé en énergie primaire, la consommation finale de chaque vecteur énergétique est pondérée par un coefficient. La méthodologie décrit ainsi de manière précise les attentes sur les besoins, les consommations, la part

des énergies renouvelables, et sur la balance énergétique globale illustrée à travers la Fig. I.7. Enfin, le non-respect d'un des indicateurs respectifs de chaque axe disqualifie le bâtiment qui ne peut donc pas accéder au titre de *nearly* ZEB.

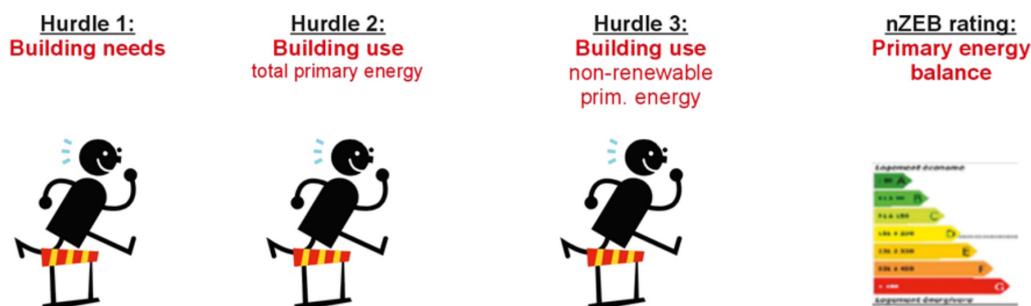


FIGURE I.7 – Description des quatre axes amenant à l’attribution du titre de *nearly* ZEB d’après ZIRN-GIBL (2014).

I.3.5 Les initiatives françaises

En France, le principe appliqué est celui du gagnant gagnant. Afin d’encourager la construction de maisons performantes des aides sont proposées, aux futurs propriétaires dans le privé, et aux collectivités dans le public. La conduite des travaux permet en retour aux entreprises de valoriser un savoir faire et développer une expertise. Les retours techniques, technologiques, économiques, et logistiques résultant amènent le secteur du bâtiment à se réorganiser tout en aidant à la préparation de la future réglementation, la RT 2020.

L’association *Éffinergie*⁷ propose ainsi en 2013, deux nouveaux labels : *Effinergie+* et BEPOS-*Éffinergie* permettant de valoriser une performance énergétique du bâtiment supérieure au cadre réglementaire. Dans les deux cas la valeur maximale du B_{bio} , du C_{ep} max, de l’étanchéité à l’air ou de l’efficacité des équipements sont renforcés. Il est aussi nécessaire d’évaluer les consommations dues aux équipements internes et de faire un suivi des consommations du bâtiment à l’utilisateur. Le label BEPOS-*Éffinergie* va plus loin que le label *Éffinergie+* en rendant obligatoire l’évaluation en énergie grise sur le bâtiment mais aussi sur le comportement des occupants (*Éco-mobilité*⁸). Finalement la production locale doit permettre de compenser la consommation amenant à un bilan en énergie primaire positif (modulé suivant les règles de la RT 2012 pour tenir compte de la diversité des conditions françaises).

Plus récemment, en novembre 2016, l’état ouvre la période d’expérimentation des BEPOS à bas carbone avec le programme Objectifs Bâtiments Énergie Carbone (OBEC) sur la base d’un nouveau référentiel : le label E+/C- (MINISTÈRE 2016). Il permet de classer suivant quatre niveaux la performance énergétique, et suivant deux niveaux le taux d’émission en CO₂ des bâtiments. L’objectif cible est la préparation de la RT 2012 à travers trois sous-objectifs :

- sensibiliser les filières du bâtiment
- améliorer la compétence des acteurs du bâtiment
- alimenter les bases de données économiques, énergétiques, et environnementales

Au niveau énergétique (partie E+), l’obtention des deux premiers niveaux implique l’amélioration du bâti et des systèmes. Le niveau trois nécessite en plus l’utilisation d’un mode de production locale en *EnR* pour compenser la consommation du bâtiment. Enfin le dernier niveau indique que le bâtiment a

7. <https://www.effinergie.org/web/index.php/les-labels-effinergie/>

8. <https://www.effinergie.org/web/index.php/effinergie-ecomobilite>

un bilan négatif ou nul et qu'il contribue à la production en *EnR* du quartier. Pour la partie C- le respect du label nécessite de ne pas dépasser une valeur seuil sur respectivement le cycle de vie du bâtiment ($E_{ges,max}$) et plus spécifiquement pour les matériaux de construction et équipements ($E_{gesPCE,max}$).

L'association *Éffinergie* propose, trois nouveaux labels sur la base du référentiel E+/C- : BBC *Éffinergie* 2017, BEPOS *Éffinergie* 2017, BEPOS + *Éffinergie* 2017, qui impliquent respectivement le respect à minima d'un niveau 2, 3, et 4 sur le critère E+ et de 1 sur le critère C-. De par leurs exigences, ces nouveaux labels s'inscrivent dans une démarche plus globale en tenant compte de la performance énergétique mais aussi de l'émission des GES, du confort des occupants et de la sobriété qui est pour rappel l'élément clé du scénario *négaWatt*. Concernant la partie C- ces labels n'exigent cependant pas une performance supplémentaire et se contentent même du premier niveau.

Afin de certifier son bâtiment comme étant très peu émetteur de GES, le label bas carbone de l'association *BBCA*⁹ peut être demandé. Le pré-requis pour l'évaluation du bâtiment est l'obtention du niveau 2 sur le critère C- du référentiel E + C-. L'évaluation se fait suivant quatre grandes étapes et un système de points permet d'évaluer le niveau du bâtiment d'où découle un classement qualitatif : *BBCA*, *BBCA Performance*, et *BBCA Excellence*. L'indicateur évalue à travers ce processus les réductions de GES (construction et utilisation), l'économie circulaire, et l'utilisation de matériaux bio-sourcés.

Finalement à travers le projet de recherche COMEPOS il est testé la faisabilité technique comme économique de technologies innovantes afin de mieux maîtriser les surcoûts de construction d'une MEPOS. COMEPOS est un projet visant à traduire le concept de BEPOS pour la maison individuelle regroupant à la fois des universitaires, des industriels, et des constructeurs immobiliers travaillant de concert. Le projet a pour vocation de permettre l'accélération de la mise en place sur le marché des MEPOS en montrant leur faisabilité à travers 25 démonstrateurs innovants répartis dans toute la France. Chaque maison propose une conception différent, que ce soit sur la géométrie ou l'enveloppe du bâti, les systèmes retenus, ou encore la clientèle ciblée. Le projet est organisé en six lots :

1. Identification des verrous et proposition d'un concept de BEPOS.
2. Choix des équipements et composants innovants à mettre en place dans chaque démonstrateurs.
3. Évaluation de la faisabilité à travers des simulations dynamique du comportement du bâtiment et une analyse du cycle de vie.
4. Construction des démonstrateurs.
5. Suivi de la performance en temps réel de chaque démonstrateur : analyse du pilotage, retour d'expérience des occupants.
6. Valorisation et suivi du projet.

L'objectif principal du projet est la garantie de performance en confrontant les résultats obtenus par la simulation à ceux obtenus par monitoring lors de l'occupation des démonstrateurs. L'expérience acquise permettra ainsi aux constructeurs de mieux anticiper les besoins et contraintes propre à la construction de futurs MEPOS à l'horizon 2020.

La France a ainsi été très active tant au niveau réglementaire que incitatif et propose aujourd'hui des certifications permettant à un propriétaire ou un maître d'ouvrage de valoriser un choix réfléchi tant sur le plan énergétique, que environnemental, social ou sociétal. Les données recueillies permettront ainsi de mieux préparer les acteurs du bâtiment aux contraintes de la future réglementation nécessaire pour respecter les engagements sur le climat.

9. <http://www.certivea.fr/offres/label-bbca-batiment-bas-carbone>

I.3.6 Bilan sur la maison à énergie positive

Le BEPOS pourtant simple dans l'idée nécessite la prise en compte de nombreux facteurs : le choix du ou des indicateurs évalués, l'intermittence des énergies, les usages pris en compte, la période et les limites physiques considérées, le type de bilan, et finalement le processus de vérification. Les divers travaux internationaux ont permis de mieux comprendre le processus de construction d'un BEPOS en proposant une synthèse des travaux effectués. De plus le nombre important de projets innovants ou de démonstrations de faisabilité permet d'identifier forces et faiblesses de chaque approche. Au niveau européen, un processus de normalisation est en cours (PREN 15603). Suffisamment générique mais précise, cette norme sera appliquée au niveau national dans le respect des spécificités de chaque pays. C'est dans cette optique que l'état français ouvre la période d'expérimentation des BEPOS à bas carbone (programme OBEC) sur la base du nouveau référentiel : le label E+/C-. Hier un concept, les travaux au niveau international ont permis de décrire un cadre commun et de vérifier la viabilité de l'approche. Les travaux en cours au niveau national comme le projet COMEPOS devront eux permettre de préparer les professionnels du bâtiment et de mettre en exergue les forces et faiblesses de notre bouquet énergétique.

La conception d'une MEPOS est donc complexe et fait intervenir de nombreux paramètres que ce soit au niveau des systèmes, de l'enveloppe, ou même des critères propres à la définition retenue. La forte combinatoire résultant de ce constat nécessite le développement d'une méthodologie adaptée. De plus afin de respecter les nouvelles directives imposées par la norme européenne, une source locale d'énergie est nécessaire. Celle-ci exclue l'énergie exportée vers le réseau et chaque vecteur énergétique doit être évalué séparément. Ainsi la production locale revendu au réseau, par exemple par l'intermédiaire des capteurs PV ne sera pas comptabilisée. De la même manière, les consommations en énergie fossile (chaudières) ne pourront pas être compensés par une production PV même si le choix a été fait d'une installation en auto-consommation car les deux vecteurs énergétiques diffèrent. Le solaire thermique et par extension les SSC apparaissent donc comme une solution pertinente pour permettre l'obtention d'un bilan énergétique positif mais aussi assurer qu'une part suffisante en énergie renouvelable soit produite localement. C'est dans cette optique qu'il est proposé à travers ces travaux une méthodologie d'aide à décision pour la conception de MEPOS solaires. Bien que le SSC soient en théorie une solution adaptée, il reste cependant nécessaire d'évaluer le potentiel d'un couplage entre un SSC et une MEPOS

Ainsi, la section suivante introduit l'énergie solaire et les technologies existantes mais aussi les limites et difficultés liées à la caractérisation et l'évaluation de tels systèmes. Il est aussi décrit les systèmes d'équations utilisés dans le reste de cette thèse pour calculer le rendement d'un capteur solaire thermique, ou encore, les travaux dont le SSC développé dans ce manuscrit s'est inspiré.

I.4 Les systèmes solaires

Le solaire et plus particulièrement le solaire thermique est une solution pertinente pour réduire les consommations d'une MEPOS et permettre de s'assurer qu'une part importante locale soit couverte par des énergies renouvelables. L'avantage principal d'un système solaire thermique actif, est sa simplicité. Il est en effet uniquement nécessaire d'avoir un capteur solaire, une pompe et un volume de stockage. C'est pour cette raison que ces systèmes sont utilisés depuis longtemps avec plus ou moins d'efficacité. Bien que relativement simple à mettre en place en comparaison avec les autres alternatives, les SSC ne sont très populaires. Le défaut principal de ces systèmes est en effet la place que prennent les équipements et le coût d'investissement important nécessaire. Ces deux critères sont liés, un système nécessitant un nombre important de capteurs ou un volume de ballon plus important coutera plus cher et prendra plus de place. Ces deux facteurs représentent les principaux verrous qui

freinent le développement de la technologie. Il est donc nécessaire de simplifier et surtout réduire le volume des ballons tout en conservant un système solaire performant, un des objectifs de ces travaux.

Cependant avant d'introduire le SSC retenu et d'expliquer les raisons derrière ce choix, il apparaît important comme pour le BEPOS de présenter le contexte général et les différents travaux existants. En effet ce sont ces travaux qui ont permis le développement du SSC modélisé dans ces travaux afin de caractériser le potentiel d'MEPOS solaire. Cette section présente donc dans un premier temps l'énergie solaire et son potentiel au niveau de la surface terrestre. Suit une description des limites et difficultés inhérentes à la caractérisation et au dimensionnement d'un système solaire thermique comme photovoltaïque. Après une rapide description du solaire thermique et de sa place au niveau mondial et européen, un état de l'art présente les principales avancées réalisées notamment pour le développement des SSC.

I.4.1 Du soleil à la Terre

Avant de décrire les différents types de capteurs existant en solaire thermique, il est intéressant dans un premier temps de présenter le potentiel au niveau de la surface terrestre et les moyens permettant de le mesurer. En effet que ce soit pour de l'expérimental ou de la modélisation, il est toujours nécessaire de connaître a minima le rayonnement incident sur les capteurs. Dans le cas expérimental, cette information est la plupart du temps mesurée sur site afin d'être la plus précise possible. Dans le cas de la modélisation, il est nécessaire d'avoir recours à des fichiers météorologiques qui peuvent soit représenter une année complète, soit des fragments de mois qui forment le climat caractéristique du site étudié. Ces fichiers sont indispensables pour pouvoir caractériser le potentiel d'une installation solaire et donc la performance d'un SSC même si comme illustré ci-après ils ne comportent pas que des avantages.

Ainsi cette partie présente le potentiel solaire au niveau terrestre, puis décrit les moyens disponibles pour le mesurer. Il est ensuite introduit les différents fichiers météorologiques et leurs avantages et inconvénients. Cependant la plupart des maisons individuelles sont construites avec des pans de toiture inclinés que ce soit pour l'esthétique ou pour favoriser un l'écoulement pluvial ou encore améliorer la résistance à diverses conditions climatiques. Il est donc aussi introduit une méthode de calcul simplifiée permettant d'obtenir le potentiel solaire sur une surface inclinée en fonction du temps universel.

L'énergie solaire

L'énergie solaire provient sans surprise du soleil qui est une sphère gazeuse dont la température intérieure est estimée entre 8 à 40×10^6 K (DUFFIE et BECKMAN 1980). Dans ces travaux, seul le rayonnement radiatif au niveau de la photosphère nous intéresse dont la température effective est de 5777 K. On entend par température effective, la température d'un corps noir émettant la même quantité de rayonnement électromagnétique qui représente ici une approximation de la température de surface du soleil. Le soleil se trouve à $1,495 \times 10^{11}$ m de la Terre et la densité de la puissance rayonnée reçue au niveau de la surface extérieure de l'atmosphère terrestre, la constante solaire (G_{cs}) est estimée pour la première fois à 1228 W/m^2 par Claude Pouillet en 1838 (COULSON 2012, page 17). Aujourd'hui grâce aux satellites équipés de radiomètres, elle est estimée à $(1360,8 \pm 0,5) \text{ W/m}^2$ (KOPP et LEAN 2011). Après pénétration dans l'atmosphère une partie est absorbée, déviée, ou réfléchi. Il est alors considéré une part directe (G_{dir}) et une part diffuse (G_{dif}). L'irradiance directe est la part de la puissance rayonnée non dispersée au passage dans l'atmosphère et est souvent exprimée pour une surface perpendiculaire à la direction de propagation ($G_{dir,nor}$). L'irradiance diffuse est au contraire déviée lors de son passage dans l'atmosphère et est souvent exprimée à l'horizontale (G_{dif}), la direction de propagation n'étant plus unique. Finalement, la somme des parts directes et diffuses forment

l'irradiance globale exprimée à l'horizontale (G). Dans l'optique de l'évaluation d'un système solaire, il est aussi courant de décrire l'énergie solaire reçue par unité de surface : l'irradiation. Dans le cas spécifique où uniquement le spectre solaire est considéré, $0,3 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$, les termes d'enseillement ou d'insolation (I) sont cependant plus courants. Le gisement solaire (Fig. I.8) est fortement dépendant de la latitude du lieu et une majeure partie de la France a un climat propice avec une irradiation globale annuelle de 1112 kWh/m^2 .

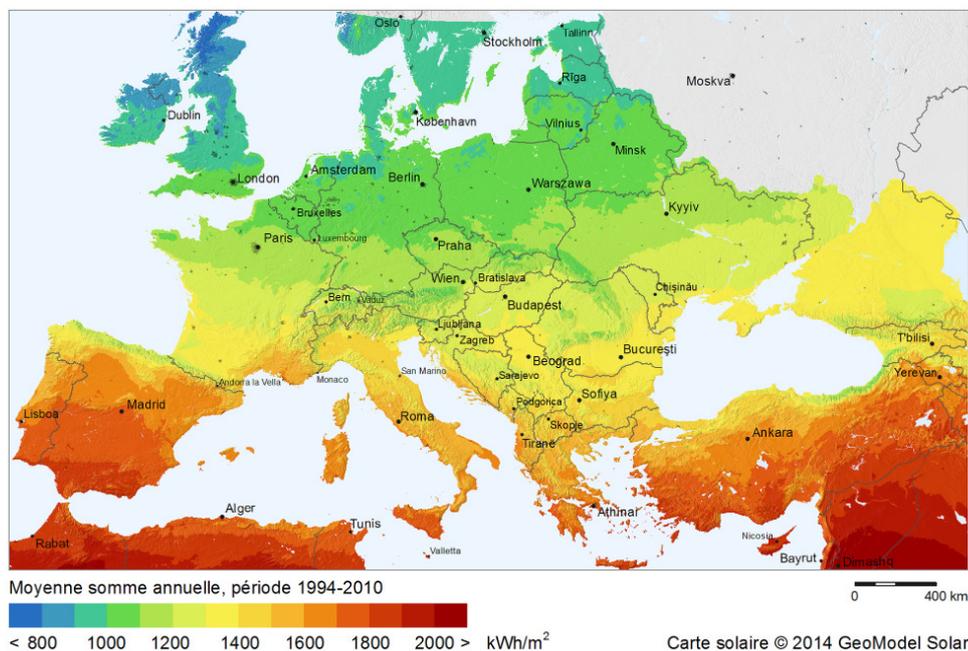


FIGURE I.8 – Irradiation globale horizontale (I) en Europe (Solargis¹⁰).

Les données météorologiques

Mesurer l'irradiation : L'énergie solaire est une énergie abondante et inépuisable, il apparaît donc opportun de chercher à l'utiliser pour nos propres applications. Pour ce faire, il est nécessaire d'estimer la quantité d'énergie disponible afin d'évaluer le potentiel solaire d'un site. Plusieurs instruments existent, les deux principaux étant le pyranomètre et le pyréliomètre qui font tous les deux partie de la famille des radiomètres : ils permettent de mesurer l'intensité du flux solaire. Le pyréliomètre est inventé en 1825 par *Herschel* (KUTZ 2013) même si l'invention ne prendra ce nom que avec la construction du pyréliomètre de *Pouillet* (BOER et DUFFIE 1985). Il permet de mesurer le $G_{dir,nor}$ grâce à un cône de visibilité très restreint même si une faible part du rayonnement issue du ciel est aussi captée (Fig. I.9a). Les rayons solaires pénètrent dans un collimateur afin d'être dirigé vers une cavité. Une thermopile est alors utilisée afin de transformer l'énergie thermique en énergie électrique. Il peut être noté que pour fonctionner correctement, l'instrument doit toujours être orienté en direction du soleil et donc monté sur un traqueur solaire. Le premier pyranomètre sphérique est quant à lui inventé en 1836 par *Belloni* (BOER et DUFFIE 1985). Contrairement au pyréliomètre, il permet de mesurer le rayonnement hémisphérique total comprenant les parts directes et diffuses (G) et ne nécessite donc pas de dispositif de suivi du soleil. Le rayonnement est aussi calculé grâce à une thermopile mais un dispositif basé sur des cellules photovoltaïques existe aussi bien que moins précis à cause d'une réponse non uniforme sur le spectre solaire. Grâce à un écran de protection, il est aussi possible d'obtenir uniquement la part diffuse ($G_{dif,hor}$) : l'intégration est faite sur l'ensemble de l'hémisphère à l'exception de l'angle solide caché par l'écran.



FIGURE I.9 – Exemple de pyrhéliomètre (a), et de pyranomètre avec écran (b).

Les fichiers météorologiques Afin d'estimer la performance d'un système solaire il est essentiel d'avoir des données d'ensoleillement. Les données météorologiques varient cependant fortement d'une année à l'autre et il est donc nécessaire de simuler un nombre important d'années afin d'obtenir le comportement moyen du système considéré. Afin de limiter la durée de simulation une autre approche est couramment retenue, l'utilisation de fichiers *typiques* (TMY, Typical Meteorological Year). Le rayonnement solaire est cependant très variable d'une année à l'autre et la construction de fichiers types est par conséquent fortement dépendante de la période considérée (Fig. I.10). Le fichier typique est ici construit à partir de données couvrant la période de 1985 à 2000. L'irradiation mensuelle du fichier typique est majoritairement inférieure à celle observée sur les dernières années, en particulier durant la période estivale. L'irradiation estivale étant importante et les besoins en chauffage inexistants, sa sous-évaluation n'est pas un facteur limitant pour l'évaluation d'un SSC. Cependant avec l'amélioration de l'isolation des bâtiments, le solaire thermique peut aussi être valorisé pour la climatisation du bâtiment même si la technologie n'est encore que peu utilisée. Dans ce cas de figure, il sera alors important de correctement estimer l'irradiation solaire même durant la période estivale afin d'évaluer correctement le potentiel du SSC.

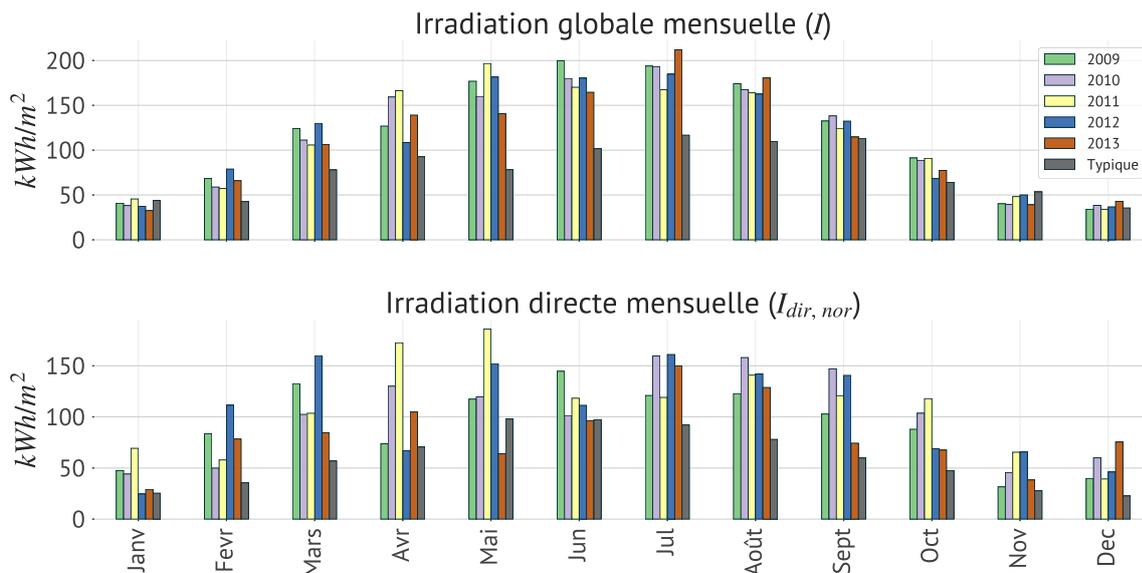


FIGURE I.10 – Comparaisons mensuelles de l'irradiation horizontale (I) (haut) et directe à la normale ($I_{dir,nor}$) (bas) pour la station météo de Mérignac et un fichier typique de Bordeaux.

Il existe ainsi deux approches possibles pour évaluer le potentiel d'un SSC. La première consiste à utiliser des données réelles du passé acquises par la mesure. Ces données peuvent alors être disponibles à plusieurs fréquences et une distinction est nécessaire entre celles récupérées par des stations météo et celles récupérées de satellites. Avec les données issues de stations météo le rayonnement est mesuré à la surface de la terre permettant d'obtenir directement le rayonnement solaire direct ($G_{dir,nor}$), diffus ($G_{dif,hor}$), ou global (G_{hor}). Néanmoins cette approche nécessite l'installation d'instruments spécifiques (pyranomètres ou pyréliomètres) à une position géographique suffisamment proche du site étudié afin de fournir des données pertinentes. En France, ces données peuvent aussi être obtenues à partir des stations météo de *Météo France* ou bien plus récemment auprès de l'organisme [WhiteBoxTechnologie](http://www.whiteboxtechnologies.com/)¹¹. Les données satellites permettent elles de récupérer les données solaires à n'importe quel point du globe (265 pays) et tiennent compte des spécificités du lieu comme du dénivelé. Le rayonnement au sol est issu de données satellites (*Meteosat*) et est calculé à partir d'images couplées à un algorithme de conversion qui dépend du type de fichier météo construit. Une fois le rayonnement global horizontal obtenu, des [algorithmes de décomposition](#)¹² sont utilisés afin de déterminer les parts respectives directe et diffuse. La Solar radiation DATA ([SODA](#)¹³) est la principale source de données regroupant les services de quatre pays : la France, les États-Unis, la Suisse, et l'Italie. Elle propose des services gratuits et payants permettant d'obtenir le rayonnement dans des conditions réelles mais aussi dans le cas idéal sans nuages grâce à un modèle simulant une atmosphère (*Copernicus McClear*) proposé par le Copernicus Atmosphere Monitoring Service ([CAMS](#)¹⁴). Le rayonnement obtenu est vérifié et validé grâce aux données terrestres disponibles.

La seconde approche permet de limiter la durée de simulation en utilisant des fichiers *typiques*. Un fichier météo comportant de nombreuses informations (températures extérieures, humidité relative, vitesse du vent, ou encore ensoleillement), il est nécessaire de définir un ordre d'importance grâce à des pondérations. De plus afin d'être cohérent temporellement un fichier typique ne doit être constitué que de blocs de fichiers réels. La méthode *Sandia* ([HALL 1978](#)) est une approche empirique couramment retenue (Fig. I.11). Elle consiste à sélectionner sur un échantillon important de données réelles (10 ans à 30 ans) 12 mois représentatifs qui sont concaténés pour former le fichier annuel. Ainsi si on considère 30 ans de données il existe 30 mois potentiels pour chaque mois de l'année. Les mois sont sélectionnés en tenant compte principalement du rayonnement direct ($G_{dir,nor}$) et global (G_{hor}) et secondairement de la vitesse du vent et les températures de l'air et de rosée. Le mois sélectionné est défini grâce à la distance de *Filkenstein-Schafer* qui correspond à la différence entre la fonction de répartition au pas horaire d'un mois et celle pour l'ensemble des mois cumulés. Cette distance est calculée pour chaque paramètre auquel un coefficient pondérateur est appliqué en fonction de son importance pour l'application considérée : le « driver ». Le mois retenu est alors le mois dont la distance moyenne pondérée est minimale et ce processus est répété pour chaque mois ([WILCOX et MARION 2008](#)). Des travaux à travers le projet [ENDORSE](#)¹⁵ ont permis de spécialiser l'approche en fonction de l'application en modifiant le « driver » pour tenir compte des spécificités du système considéré. Il est aussi ajouté la possibilité de considérer des blocs au niveau du mois, de la semaine, ou même du jour et d'obtenir un pas sub-horaire sur le fichier typique final.

11. <http://weather.whiteboxtechnologies.com/>

12. <http://www.soda-pro.com/help/helioclim/decomposition-models>

13. <http://www.soda-pro.com/>

14. <http://www.copernicus.eu/>

15. <http://www.endorse-fp7.eu/>

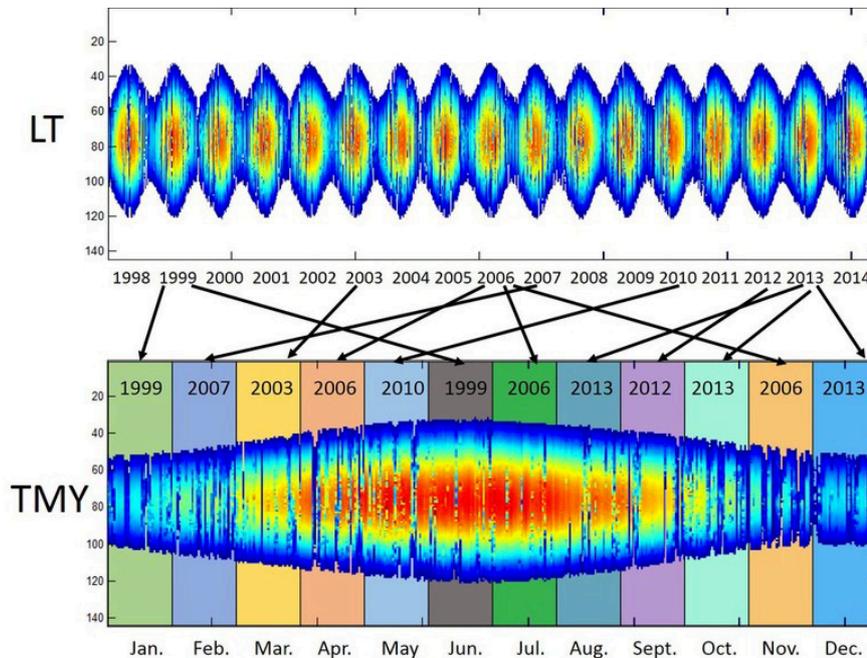


FIGURE I.11 – Sélection des 12 mois dans un échantillon (LT) pour construire une année typique (TMY) selon la méthode *Sandia*.

Déterminer le rayonnement sur une surface inclinée

L'énergie solaire est disponible sur l'ensemble du globe de manière abondante et il est possible d'utiliser soit des données réelles, soit des données typiques afin d'évaluer le potentiel d'un système pour n'importe quel emplacement. Alors que la plupart des systèmes ont une surface de capteurs inclinée les données sont le plus souvent disponibles ou à l'horizontal, ou normal à l'incidence. La Terre tournant autour du soleil et sur elle-même, il est nécessaire pour obtenir le rayonnement sur une surface inclinée de connaître sa position exacte durant chaque pas de temps simulé. Le temps utilisé couramment est le temps standard (UTC, Temps Universel Coordonné), qui est identique sur l'ensemble du globe. Le calcul de la position du soleil nécessite d'utiliser le Temps Universel ou temps solaire (UT1). Afin de tenir compte des variations locales du temps liées à la position géographique du site étudié, l'heure solaire locale (HSL) est définie par (I.1).

$$\text{HSL} = \text{HCL} + \text{EQT}(J) \quad (\text{I.1a})$$

avec EQT l'équation du temps pour le jour julien J

$$\text{EQT}(J) = 10.2 \sin\left(4\pi \frac{J-80}{373}\right) - 7.74 \sin\left(2\pi \frac{J-8}{355}\right) \quad (\text{I.1b})$$

et HCL l'heure locale civile

$$\text{HCL} = \text{UTC} + \underbrace{4(\text{LMS} - \text{LON})}_{\text{en minutes}} \quad (\text{I.1c})$$

Où LMS et LON sont respectivement la longitude du méridien de référence (0 Greenwich) et la longitude (positif vers l'ouest)

Sur une surface inclinée le rayonnement total ($G_{tot,inc}$) est défini par (I.2).

$$G_{inc} = G_{dir,inc} + G_{dif,inc} + G_{r,inc} \quad (I.2)$$

Connaissant la HSL et l'angle d'inclinaison (β_{plan}) qui est l'angle formé entre la plan incliné et l'horizontal (Si $\beta > 90^\circ$ le soleil fait face au coté opposé au plan), il alors possible de déterminer chaque composante de G_{inc} . D'après les règles de calcul de l'ASHRAE, les rayonnements diffus et réfléchi peuvent être approximés uniquement en connaissant G_{hor} , $G_{dif,hor}$ et β_{plan} (I.3) avec ρ_{sol} l'albédo du sol. Cependant la part directe ($G_{dir,inc}$) nécessite de connaître l'angle d'incidence (θ) qui est l'écart angulaire entre le segment reliant le soleil à une surface et la normale à cette même surface.

$$\begin{aligned} G_{dir,inc} &= G_{dir,nor} \times \cos(\theta) \\ G_{dif,inc} &= G_{dif,hor} \times \frac{1 + \cos(\beta_{plan})}{2} \\ G_{r,inc} &= G_{hor} \times \rho_{sol} \frac{1 - \cos(\beta_{plan})}{2} \end{aligned} \quad (I.3)$$

Le calcul de l'angle d'incidence (θ) peut être approximé par (I.4) (COOPER 1969; DUFFIE et BECKMAN 1980) et la liste des angles solaires (Fig. I.12) intervenant est décrite ci-dessous :

- La déclinaison (δ) : angle entre la droite reliant la terre et le soleil (centre) et le plan équatorial variant entre $-23,45$ et $23,45^\circ$ (positive au Nord)
- Latitude (ϕ) : position Nord-Sud d'un point par rapport à l'équateur
- L'angle horaire (AH) : L'écart en minutes séparant du midi solaire (négatif en matinée).
- L'angle zénithal (θ_z) : L'angle d'incidence solaire sur une surface horizontale
- L'altitude solaire (α_{sol}) : écart angulaire entre une surface horizontale et le segment reliant le soleil à cette même surface. C'est l'angle complémentaire de l'angle zénithal.
- Azimut solaire (γ_{sol}) : Écart angulaire entre la projection du segment reliant le soleil et une surface et le Sud (positif dans le sens horaire)
- Azimut du plan (γ_{plan}) : Déviation par rapport au Sud de la projection du plan sur l'horizontale ($-180^\circ \leq \gamma_{plan} \leq 180^\circ$). Pour une surface orienté Sud : $\gamma_{plan} = 0$.

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha) \cos(\gamma_{sol} - \gamma_{plan}) \sin \beta_{plan} + \sin(\alpha_{sol}) \cos \beta_{plan} \quad (I.4a)$$

avec :

$$\sin(\alpha_{sol}) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(AH) + \sin(\phi) \sin(\delta) \quad (I.4b)$$

$$\cos(|\gamma_{sol}|) = \frac{\sin(\alpha_{sol}) \sin(\phi) - \sin(\delta)}{\cos(\alpha_{sol}) \cos(\phi)} \quad (I.4c)$$

et :

$$\gamma_{sol} = |\gamma_{sol}| \times \text{sign}(AH) \quad (\text{I.4d})$$

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(360 \times \frac{J + 284}{365}\right) \quad (\text{I.4e})$$

$$AH = 0.25 \times \underbrace{|(HSL - 720)|}_{\text{en minutes}} \quad (\text{I.4f})$$

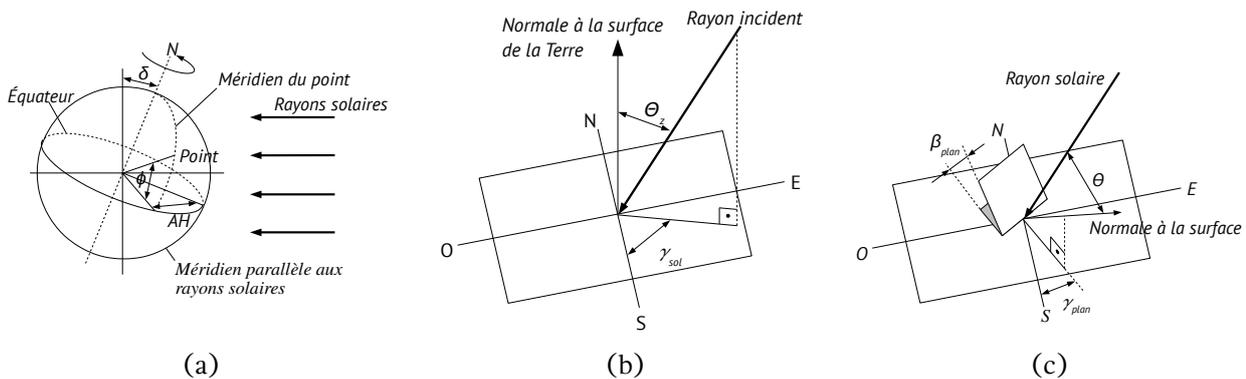


FIGURE I.12 – Représentation des différents angles solaires.

Ces équations simplifiées couplées à la géométrie du bâtiment permettent aussi de calculer les masques créés par les obstructions tels qu'une avancée de toiture ou un arbre. Il est aussi possible par exemple grâce à [Pysolar](http://pysolar.org/)¹⁶ de calculer de manière très précise la position du soleil par rapport à n'importe quel point du globe. Ces outils peuvent alors être embarqués dans des contrôleurs afin de suivre la course du soleil. Dans le cadre de ces travaux, il est particulièrement important de pouvoir évaluer la part de l'énergie solaire qui arrive sur les capteurs afin de pouvoir calculer le rendement et donc la part transmise au système solaire.

I.4.2 Valoriser l'énergie solaire

Le système le plus courant dans le domaine du bâtiment pour récupérer l'énergie solaire est appelé panneau solaire, ou capteur solaire. On distingue trois grandes familles :

- Le capteur plan
- Le capteur sous-vide
- Le capteur à concentration

Afin de pouvoir évaluer le potentiel d'un SSC, il est donc nécessaire de sélectionner un type de capteur adapté à l'application. Cependant chaque capteur a sa propre géométrie et le calcul de son rendement nécessite la connaissance de nombreux paramètres. Afin de pouvoir simplifier l'évaluation d'un capteur quelconque, une méthodologie de test universelle a été mise en place et permet d'exprimer en fonction de données communes à tous les systèmes solaires, le rendement du capteur indépendamment de sa géométrie. Ces corrélations sont utilisées dans ces travaux afin de modéliser le comportement des capteurs solaires.

Ainsi les différents types de capteurs sont dans un premier temps présentés puis la méthodologie de calcul retenue pour la modélisation des capteurs solaires thermique est détaillée.

16. <http://pysolar.org/>

Le capteur plan

C'est le système le plus ancien et aujourd'hui encore le plus économique. Parmi les capteurs plans, une distinction peut être faite entre les capteurs avec et sans vitrage.

Le capteur non-vitré : Un capteur solaire sans vitrage est composé d'un tube en plastique noir laissant passer un fluide caloporteur. Le tube absorbe une partie du rayonnement solaire incident qui est ensuite transmis au fluide par conduction. L'énergie restante est perdue soit par convection soit par rayonnement (Fig. I.13a). C'est le système le plus simple et le plus économique mais les pertes importantes par convection et rayonnement infrarouge font que ce système n'est pas très performant. N'ayant pas de protection, ni d'isolation il est en effet très sensible au vent, à la température extérieure, et aux échanges avec la voûte céleste. Pour ces raisons, il est principalement utilisé pour des opérations annexes telles que le chauffage de piscines.

Le capteur vitré : L'invention du capteur vitré a permis de réduire de manière importante les pertes thermiques par convection et par rayonnement infrarouge. De manière schématique, un capteur vitré est composé d'une surface transparente, d'un absorbeur, de tubes, et d'un isolant thermique (Fig. I.13b). Un vitrage est utilisé pour la surface transparente afin de laisser passer la majorité du rayonnement solaire (visible et Proche InfraRouge (PIR)) de par ces propriétés optiques. L'absorbeur comme son nom l'indique doit permettre d'absorber au maximum l'énergie solaire et émettre le moins possible dans l'infrarouge. En effet d'après la loi du déplacement de *Wien*, à température ambiante les objets émettent spontanément dans l'InfraRouge Moyen (MIR) soit pour une longueur d'onde de $3\ \mu\text{m}$ à $50\ \mu\text{m}$. L'absorbeur est ainsi de couleur noire ($\leq 95\%$) afin d'absorber un maximum dans le visible et subit un traitement chimique (chrome ou céramique à base d'oxydes métalliques) afin d'obtenir une surface faiblement émissive ($\leq 12\%$). Le vitrage peut lui aussi être faiblement émissif afin de laisser passer le rayonnement solaire mais réfléchir le MIR. La combinaison des deux permet ainsi de récupérer la majorité du spectre solaire au niveau de l'absorbeur tout en limitant les pertes par inter-réflexions. Les tubes contenant le fluide sont couramment en cuivre car il est simple à travailler et a une conductivité thermique importante ($\lambda = 390\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Finalement l'isolant en face arrière et sur les côtés permet de réduire les pertes par conduction.



FIGURE I.13 – Exemple de capteur plan non vitré (a), et vue explosée d'un capteur vitré (b).

Le capteur sous-vide

À la différence du capteur plan, le capteur sous-vide réduit les déperditions au niveau de l'absorbeur en remplaçant l'air par du vide supprimant les échanges convectifs. On distingue quatre types : le capteur à circulation directe, le capteur à caloduc, le capteur à effet « Thermos », et le capteur à réflecteur intégré. Pour le capteur à circulation directe, l'absorbeur est une structure plane à ailettes

et la circulation de l'eau est assurée par un système de tubes en U. L'absorbeur de chaque tube est contrairement aux autres modèles, orientable, ce qui permet de les utiliser en façade. Le capteur à caloduc (Fig. I.14a) utilise le principe de la vaporisation de l'eau déminéralisée. L'eau en se vaporisant remonte jusqu'à la tête du caloduc et s'y condense au contact du fluide caloporteur. Le capteur à effet « Thermos » est lui composé de deux tubes concentriques, le tube intérieur étant l'absorbeur. Le vide est réalisé entre les deux tubes et l'échange de chaleur se fait soit par un système de caloduc, soit directement par circulation du fluide dans le tube intérieur. Afin d'améliorer la part solaire reçue, un réflecteur peut être ajouté soit sur la paroi intérieure du tube extérieur soit à l'extérieur (CPC, Schott-Rohglas).

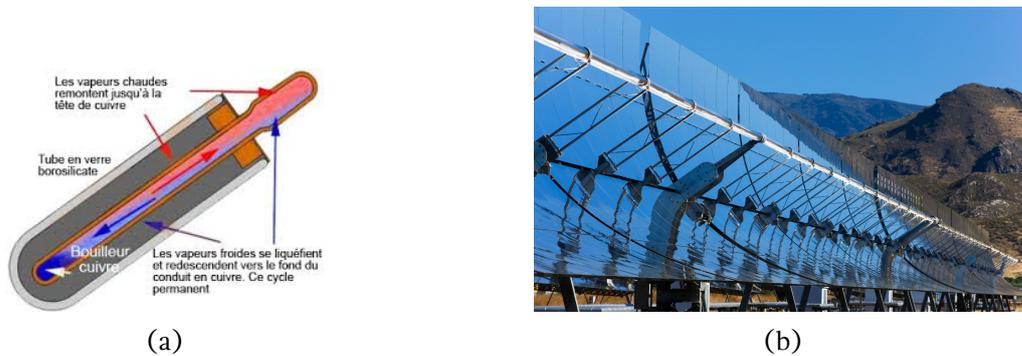


FIGURE I.14 – Fonctionnement d'un capteur sous-vide à caloduc (a). Exemple de capteur cylindro-parabolique (b).

Le capteur à concentration

Ces capteurs cherchent à concentrer en un point focal le rayonnement direct grâce à un système de réflecteur ou de lentille. Grâce à l'énergie concentrée la température atteinte sur ce point est comprise entre 400 °C à 1500 °C en fonction des systèmes. Non compatible avec des installations traditionnelles de chauffage ou de production d'ECS les capteurs à concentration sont en majorité utilisés pour des applications industrielles. Cependant des systèmes de cogénération se développent en couplant par exemple un moteur à vapeur avec des capteurs à concentration cylindro-paraboliques, mais les applications restent mineures. Par contre contrairement aux capteurs précédents, les hautes températures obtenues permettent de fabriquer de l'électricité soit par conversion directe, soit par détente. Dans cette famille, une distinction est faite entre, les capteurs cylindro-paraboliques, les capteurs paraboliques, les centrales à tour, et les fours solaires. Les capteurs cylindro-paraboliques (Fig. I.14b) utilisent des réflecteurs cylindriques orientables sur un axe (pour suivre le soleil) afin de concentrer le rayonnement direct sur un foyer linéaire où passe un fluide (souvent de l'huile). Le fluide est ensuite utilisé pour transformer de l'eau en vapeur qui est ensuite envoyée vers une turbine pour fabriquer de l'électricité par détente. Les capteurs paraboliques emploient un système de suivi du soleil sur deux axes et un réflecteur en forme de **paraboloïde de révolution**¹⁷ afin de pouvoir concentrer en un point unique le rayonnement : le point focal. L'électricité est produite par conversion directe via un moteur *Stirling*.

Le système de tour solaire est lui aussi basé sur la concentration des rayons solaires sur un point unique et permet d'obtenir une source chaude allant jusqu'à 1500 °C. Un champ de miroirs orientables ayant un système de suivi sur deux axes (« héliostats »), réfléchissent toute la journée l'énergie solaire vers un absorbeur au sommet d'une tour. L'électricité est fabriquée soit à l'aide d'une turbine et d'un fluide intermédiaire, soit par production directe. Finalement le dernier dispositif est le four solaire composé d'un miroir concave concentrant le rayonnement en son foyer. Deux applications

17. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Paraboloïde>

peuvent être notées. La première est la production d'électricité comme par exemple avec le four solaire français mondialement connu d'Odeillo qui permet d'atteindre une puissance d'1 MW. Il utilise un ensemble de miroirs orientables (héliostats) dirigeant les rayons vers un miroir concave géant concentrant les rayons vers le foyer. La deuxième application est la cuisson avec des appareils plus ou moins rudimentaires.

Rendement d'un capteur solaire thermique

Le rendement (η) d'un capteur solaire (I.5) est fonction de la puissance utile rapportée à la surface du capteur (P_u , [W/m²]) et du flux solaire incident (G_{in} , [W/m²]).

$$\eta = \frac{P_u}{G_{in}} \quad (I.5)$$

Comme il a été vu à travers les différents capteurs existants, de nombreux facteurs influencent le calcul de P_u . Il est en effet nécessaire de considérer les caractéristiques optiques et thermiques des différents composants du capteur. Si on considère un capteur plan non-vitré, P_u est définie comme la part absorbée moins les pertes par convection, conduction, et rayonnement infrarouge (DUFFIE et BECKMAN 1980, voir équations 5.9.2 et 6.2.1). Ces relations nécessitent cependant de connaître la température moyenne de l'absorbeur dont la mesure ou le calcul est ardu. En effet, elle dépend à la fois du rayonnement incident, du fluide entrant dans le capteur, mais aussi de la géométrie propre à chaque capteur. Ainsi afin de simplifier l'évaluation de la performance d'un capteur quelconque, il est nécessaire de reformuler le problème. Les corrélations présentées ci-après, aujourd'hui utilisées pour estimer la performance d'un capteur solaire sont issues des travaux amorcés par HOTTEL et WHILLIER (1958). Dans la première corrélation (I.6), η_0 est le facteur optique du capteur, K la conductance thermique totale des pertes, et T_{ext} la température de l'air extérieur. Cette formulation implique une représentation linéaire de la performance du capteur et a vite montré ses limites.

$$P_u = \eta_0 \times G_{in} - K(T_{moy} - T_{ext}) \quad (I.6a)$$

avec

$$T_{moy} = \frac{T_{fluide}^{entrée} + T_{fluide}^{sortie}}{2} \quad (I.6b)$$

Approche instantanée : Dans les années 1990 avec la norme ISO 9806-1 une nouvelle corrélation plus précise est définie. Celle-ci dépend de deux nouveaux coefficients (c_1 et c_2) permettant d'estimer plus finement la performance en fonction de T_{ext} (I.7). la norme ISO 9806-1 considère la surface de l'absorbeur alors que la norme européenne EN 12975-2 : 2001 considère la surface d'entrée (EN 12975-2 2001). Ainsi en fonction de la norme considérée la valeur des coefficients varie et certains organismes de certification fournissent aussi la valeur de ces coefficients suivant la surface totale du capteur.

$$P_u = \eta_0 \times G_{in} - c_1(T_{moy} - T_{ext}) - c_2(T_{moy} - T_{ext})^2 \quad (I.7)$$

Afin d'obtenir une meilleure approximation, l'approche stationnaire tient compte de l'angle d'incidence en considérant un modificateur d'angle d'incidence (IAM, Incidence Angle Modifier). Il est défini par $K_\theta(\theta)$ comme le rapport entre le rendement optique pour un angle θ et le rendement optique à incidence normale ($\theta = 0$).

$$K_\theta(\theta) = \frac{\eta_0(\theta)}{\eta_0(\theta = 0)} \quad (I.8)$$

L'approche statique ne fait cependant pas de distinction entre $G_{dir,in}$ et $G_{dif,in}$. Ainsi l'approche dans

ces conditions n'est valide que lorsque $G_{dif,in}$ représente moins de 30 % du rayonnement hémisphérique total G_{in} (OSÓRIO et CARVALHO 2014). Finalement la procédure de test ajoute la prise en compte du $C_{p,eff}$, la capacité thermique massique effective définie comme étant la somme pondérée des capacités massiques des différents composants du capteur. Ces facteurs de pondération indiquent que certains éléments ne sont impliqués que partiellement dans l'inertie thermique du capteur. c_5 , un nouveau coefficient de corrélation est alors défini par $C_{p,eff}/A$ où A est la surface de capteur considérée par la norme retenue. En couplant les différentes informations, il est possible d'obtenir la forme complète de l'équation instantanée (I.9).

$$P_u = \eta_0 K_\theta(\theta) \times G_{in} - c_1(T_{moy} - T_{ext}) - c_2(T_{moy} - T_{ext})^2 - c_5 \frac{dT_{moy}}{dt} \quad (I.9)$$

Approche quasi-dynamique : La procédure de test quasi-dynamique est quant à elle décrite à travers l'ISO 9806-3 aussi introduite dans la norme EN 12975-2 : 2001 (EN 12975-2 2001) aujourd'hui remplacée par la EN 12975-2 : 2006 (EN 12975-2 2006). Contrairement à l'approche précédente, trois nouveaux coefficients sont introduits. Les deux premiers décrivent l'impact du vent sur le rendement optique (c_6) et sur les pertes thermiques (c_3), le dernier, c_4 , permet de tenir compte des pertes par MIR. Comme explicité dans I.4.2 les capteurs plans vitrés et les capteurs sous-vide sont peu sensibles à l'impact du vent et du rayonnement MIR. Ces coefficients doivent cependant être considérés pour des capteurs non-vitrés. HUNN et al. (1977) montrent en effet que les pertes par rayonnement infrarouge représentent près de 25 % des pertes annuelles pour ces capteurs. Que ce soit pour l'approche statique ou dynamique, les coefficients sont obtenus à partir des données expérimentales et des régressions linéaires multiples. L'approche quasi-dynamique contrairement à l'approche statique considère aussi séparément le rayonnement diffus et direct en introduisant deux IAM. Il sont notés dans le reste de ce document respectivement par $K_{\theta,dir}$ et $K_{\theta,dif}$. Dans le cas des capteurs plans dont le comportement est isotropique, il est admis (I.10) où b_0 est le coefficient modificateur d'angle d'incidence (ZAMBOLIN et COL 2010)

$$K_{\theta,dir}(\theta) = 1 + b_0 \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \quad (I.10)$$

Pour un capteur tubulaire, sa géométrie complexe nécessite de considérer θ_t et θ_l , respectivement la projection transversale et longitudinale de l'angle d'incidence. L'impact de l'angle d'incidence sur $G_{dir,in}$ est donc défini par $K_{\theta,dir}(\theta_t, \theta_l)$. D'après McINTIRE (1982) il est possible d'approximer $K_{\theta,dir}(\theta_t, \theta_l)$ comme étant le produit des deux projections (I.11).

$$K_{\theta,dir}(\theta_t, \theta_l) = K_{\theta_t,dir} \times K_{\theta_l,dir} \quad (I.11)$$

Pour $K_{\theta_t,dir}$ il est admis la même relation que pour le capteur plan (I.10). Cependant afin de pouvoir apprécier la complexité de $K_{\theta_l,dir}$ un polynôme d'ordre 4 de la forme (I.12) peut être utilisé (ZAMBOLIN et COL 2012). Pour note, la norme considère (I.10) dans les deux cas.

$$K_{\theta_l,dir}(\theta) = 1 + b_0 \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) + b_1 \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right)^2 \quad (I.12)$$

$$+ b_2 \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right)^3 + b_3 \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right)^4 \quad (I.13)$$

$$(I.14)$$

Ainsi si on tient compte de l'ensemble des paramètres la forme complète de l'équation en quasi-dynamique est définie par (I.15) : u (m/s) étant la vitesse du vent, σ la constante de Stefan-Boltzmann, et E_L ($W/(m^2.K^4)$) la part du rayonnement infrarouge non comprise dans le spectre solaire (longueur d'onde $> 3 \mu m$).

$$P_u = \eta_0 K_{\theta,dir}(\theta) \times G_{in,dir} + \eta_0 K_{\theta,dif}(\theta) \times G_{in,dif} \quad (I.15)$$

$$- c_6 u G_{in} - c_3 u (T_{moy} - T_{ext}) - c_4 (E_L - \sigma T^4) \quad (I.16)$$

$$- c_1 (T_{moy} - T_{ext}) - c_2 (T_{moy} - T_{ext})^2 - c_5 \frac{dT_{moy}}{dt} \quad (I.17)$$

Bilan : Les deux approches permettent aujourd'hui de tester tout type de capteurs solaires en se basant sur une méthodologie commune facilitant la comparaison entre divers fabricants. L'ensemble des organismes de certification propose ainsi les données nécessaires pour appliquer soit la méthode statique, soit la méthode quasi-dynamique. Les résultats montrent cependant que la méthode quasi-dynamique permet d'obtenir de une meilleure précision, en particulier en matinée et en soirée où l'approche statique sur-estime l'énergie récupérée (Fig. I.15)

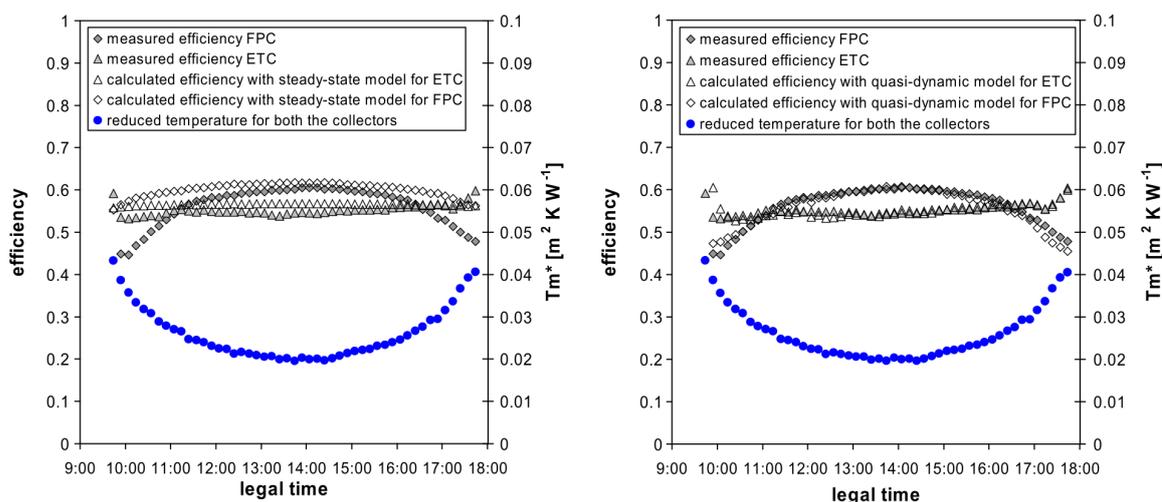


FIGURE I.15 – Comparaisons de résultats expérimentaux et des résultats obtenus à partir de la méthode statique (gauche) et de la méthode quasi-dynamique (droite) d'après ZAMBOLIN et COL (2010).

Finalement, la nouvelle norme (EN ISO 9806 :2013) actuellement en finition permet d'obtenir une norme commune sur le plan international, et remplace l'ensemble des précédentes qui font alors doublons : EN 12975-2 : 2006 et ISO 9806-1, 2, 3 (EN ISO 9806 2013).

Maintenant que la méthode de calcul quasi-dynamique utilisée dans ces travaux est introduite, une présentation de l'évolution globale du marché du solaire thermique est proposée.

I.4.3 Le solaire thermique en chiffres

Avant de discuter des différents travaux déjà réalisés dans le solaire thermique et plus particulièrement pour les SSC, il est intéressant de faire une description rapide de l'évolution du secteur à différentes échelles. Cette partie discute aussi des initiatives internationales actuellement en cours afin d'encourager le développement des SSC.

Les chiffres clés

L'IEA actualise tous les ans son rapport sur l'évolution mondiale du solaire thermique dans le cadre de son programme « Solar Heating and Cooling » (SHC). Dans la dernière édition, la couverture des données représente 95 % du marché mondial (WEISS et al. 2017). Ainsi fin 2016, près de 456 GW_{th} sont installés et une évolution de 7,4 % est enregistrée depuis le début du siècle. Cette évolution est portée par un fort développement des structures industrielles ($\geq 350 \text{ kW}_{\text{th}}$ ou $\geq 500 \text{ m}^2$). La plus grande installation à ce jour étant au Danemark avec près de 110 MW_{th} pour 156 694 m² de capteurs plans représentant 30 % de la surface installée courant 2016. Historiquement, la puissance maximale double tous les ans depuis 2013 :

2013 : Marstal au Danemark avec $\sim 20\,000 \text{ m}^2$

2014 : Chili avec $\sim 39\,000 \text{ m}^2$

2015 : Vojens au Danemark avec $\sim 70\,000 \text{ m}^2$

2016 : Silkeborg au Danemark avec $\sim 156\,000 \text{ m}^2$

Parmi les 66 pays analysés, le marché est majoritairement situé en Chine (309,5 GW_{th}) et plus modestement en Europe (49,2 GW_{th}) qui à eux deux représentent 82,3 % de la puissance thermique installée. Ramené au nombre d'habitant, il peut être observé que le marché se développe plutôt bien en Europe avec l'Autriche (421 kW_{th}/(1000hab)), la Grèce (287 kW_{th}/(1000hab)), ou l'Allemagne (164 kW_{th}/(1000hab)) contre 226 kW_{th}/(1000hab) pour la Chine. En France, le solaire thermique n'est que peu développé avec seulement 22,03 kW_{th}/(1000hab) (hors DOM) alors que l'ensoleillement (1112 kW h²/m) est en moyenne plus important que pour l'Allemagne (1091 kW h²/m). Le solaire a ainsi permis en 2016 d'éviter au niveau mondial, l'émission de 130 Mt de CO₂ et 40,3 Mt de produits pétroliers et respectivement 362 t et 112 Mt en France.

Malgré une progression de la surface installée chaque année, la tendance décroît de 14 % en 2015 par rapport à 2014 et la baisse semble continuer en 2016. Au niveau économique, le marché stagne en Europe et est décroissant dans le reste du monde à l'exception de l'Afrique Sub-Saharienne et de l'Asie (Chine non-inclus). L'énergie solaire thermique assume donc une perte d'intérêt importante depuis le début du siècle (Fig. I.16). Depuis 2010 le solaire thermique progresse de plus en plus lentement et à partir de 2014 les autres énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque) affichent une progression nettement plus importante. Ainsi à partir de 2016 l'énergie éolienne produit plus d'énergie que le solaire thermique. Finalement le photovoltaïque qui profite d'une croissance forte et d'une tendance à la hausse depuis 2014 semble rapidement rattraper son retard.

L'association Allemande (*BSW-Solar*, German Solar Industry Association) a publié une carte des installations industrielles mondiales et met en avant les principaux facteurs responsables du développement du solaire thermique (AUGSTEN et EPP 2017). Le marché semble être en premier influencé par le prix des énergies fossiles, suivi par les considérations politiques des états imposant une part plus importante d'énergies renouvelables. Arrivées en second en 2013, les aides financières sont reléguées à la troisième place avec cette nouvelle étude en 2016. Les industriels mettent aussi en avant le scepticisme des consommateurs vis à vis du solaire thermique alors que 70 % des groupes interrogés estiment que le marché est déjà compétitif. Finalement le marché entre de plus en plus en compétition avec les installations PV pour lesquelles les industriels s'accordent majoritairement sur leur compétitivité.

Applications : Au niveau mondial 108 millions de systèmes sont référencés en 2015, dont trois-quarts sont des systèmes à thermosiphon, et sont majoritairement utilisés pour la production d'ECS : 63 % dans des maisons individuelles et 28 % sur des bâtiments plus importants comme les hôpitaux

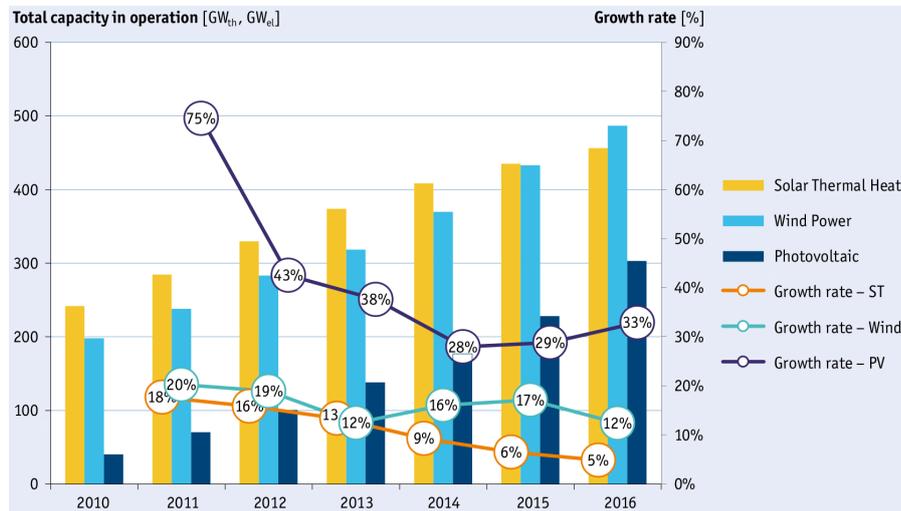


FIGURE I.16 – Évolution tendancielle et en puissance installée cumulée de la répartition du solaire thermique, de l'éolien, et du photovoltaïque d'après WEISS et al. (2017).

ou les écoles. La tendance actuelle semble cependant inverser les proportions avec une forte décroissance en 2015 de la part de la production d'ECS en maison individuelle et une forte croissance dans les autres bâtiments amenant à une répartition pour les nouvelles installations de 41 % en maison individuelle et de 51 % pour les autres bâtiments. Les SSC restent très minoritaires et représentent seulement 2 %. Finalement 6 % sont utilisés pour le chauffage des piscines et les 1 % restants alimentent des réseaux de chaleur, des processus industriels, ou encore des systèmes de refroidissement. Au niveau européen le marché est principalement tourné vers les capteurs plans avec 72,3 % des parts et contrairement à la tendance mondiale les systèmes comportent pour 61 % des pompes. La part des système de production d'ECS en maison individuelle est la même qu'au niveau mondial, cependant les grandes installations ne représentent plus que 12 %. Alors que dans la plupart des autres pays du monde, le SSC représente une part infime, il représente en Europe 19 % des systèmes installés même si la tendance est à la baisse : 17 % en 2014 (MAUTHNER et al. 2016) et 16 % en 2015 (WEISS et al. 2017).

Les travaux en cours

Afin d'encourager le développement des systèmes solaires, l'IEA travaille actuellement sur le développement économique des systèmes solaires. Ces travaux s'articulent à travers deux tâches. La première, la tâche 53 cherche à évaluer le potentiel de l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque) pour le refroidissement qui avec les BEPOS deviendra un secteur clé de la consommation du bâtiment. La tâche s'articule suivant trois sous-tâches :

- A :** Caractériser le potentiel des systèmes existants et proposer une méthodologie commune permettant de les comparer économiquement. Proposition de nouveaux systèmes et évaluation de l'interaction avec le réseau.
- B :** Utilisation de la simulation pour comparer les systèmes et mieux comprendre les interactions entre composants et conditions limites.
- C :** Mise en place d'une évaluation expérimentale pour établir un standard de test, vérifier les modèles, collecter, et analyser les données.

La seconde, la tâche 54 axe ses recherches sur la compétitivité économique des systèmes solaires. Le but étant d'arriver à une standardisation des divers composants et de proposer des systèmes « plug

and play » nécessitant moins de maintenance. Cette évolution implique une réduction du coût de production et d'installation en plus de simplifier l'offre existante et s'articule ainsi :

- A :** Analyse du marché et définition d'indicateurs pour comparer le coût sur les différentes phases : construction, distribution, installation, et maintenance.
- B :** Simplification et standardisation des systèmes pour faciliter les différentes phases.
- C :** Recherche sur des composants et matériaux innovants avec en priorité leur viabilité économique dans le respect des sous-tâches A et B.

Les deux tâches ont en commun une sous-tâche supplémentaire (D) montrant une volonté de synergie. Le rôle de cette sous-tâche est en effet d'assurer une coopération continue entre l'industrie et la recherche, condition nécessaire pour permettre d'exploiter et valoriser rapidement les résultats de recherche. Des innovations comme l'invention d'une vanne thermostatique fonctionnant sans contrôleur électrique (*Conico*¹⁸) permettent déjà d'apprécier les retombées. De plus une **nouvelle tâche** qui doit commencer début 2018 devrait permettre d'accompagner le développement de systèmes mixtes permettant de produire de manière combinée électricité et énergie thermique.

Bilan

Les applications en solaire thermique sont nombreuses mais subissent une tendance négative en comparaison avec les autres énergies renouvelables. Le secteur du solaire thermique est ainsi au niveau mondial en décroissance forte et stagne sur le continent Européen. Bien que des applications de SSC existent au niveau Européen, la tendance est aussi à la baisse. Ces tendances traduisent une perte de confiance dans cette technologie déjà observée par les industriels. La même observation est faite par MUSALL et al. (2010) à travers l'analyse de 280 Net ZEB qui montrent que moins de 10 % des maisons individuelles sélectionnent un SSC comme mesure là où près de 70 % recommande une production d'ECS solaire. Le SSC est ainsi aujourd'hui une technologie principalement utilisée dans la rénovation (ELLEHAUGE 2003). L'ouverture de nouveaux travaux de recherche sur l'aspect économique ou sur les applications de refroidissement permettront à terme d'améliorer la compétitivité du secteur et de mieux valoriser ces systèmes pour les nouvelles problématiques du bâtiment.

Comme illustré dans les sections précédentes, le solaire thermique doit afin d'inverser la tendance proposer des solutions performantes et adaptées au BEPOS. Dans cette optique il est nécessaire de pouvoir évaluer la performance potentielle du couplage entre une BEPOS et un SSC et de réduire la taille des équipements nécessaires qui représentent un frein à son développement. De plus la norme en préparation (PREN 15603) amène aussi à reconsidérer la manière de construire des BEPOS et les SSC peuvent permettre d'atteindre la couverture locale en énergie renouvelable nécessaire. Les SSC restent donc une solution du futur mais leur dimensionnement doit être adapté aux nouveaux bâtiment et non uniquement basé sur l'expérience acquise sur les anciens.

I.4.4 Les travaux sur le solaire thermique

Afin de pouvoir proposer un système adapté, un état de l'art est proposé. Celui-ci décrit dans un premier temps les travaux sur le solaire thermique de manière générale, puis plus spécifiquement sur les SSC en présentant les divers systèmes existants et les résultats obtenus. Enfin des exemples d'analyse paramétriques et d'optimisation sont discutés.

18. <http://www.iea-shc.org/article?NewsID=177>

Les études pionnières

La recherche sur le chauffage des bâtiment par énergie solaire semble débuter en 1939 au « Massachusetts Institute Technology » (MIT). La première maison avec chauffage solaire, *Solar House I*¹⁹ voit le jour. Il faudra attendre 1972 et 1974 pour voir apparaître respectivement en France et en Angleterre les premières maisons solaires utilisant des systèmes passifs et actifs (MICHAELIDES 1993). Un modèle numérique développé par HUNN et al. (1977) permet en 1977 d'évaluer pour un pas de temps horaire l'effet des conditions météorologiques sur la performance d'SSC. Étudiant la performance des capteurs, il conclut qu'une seconde vitre sur les capteurs plans permet d'améliorer les performances dans un climat caractérisé par une forte couverture nuageuse. Ces travaux sont complétés par EL-SAYED (1989) qui étudie plus en détail la transmission du rayonnement à l'absorbeur en étudiant par exemple l'impact de l'albédo et du nombre de vitres sur le capteur. L'étude conclut qu'une variation de 10° à 15° induit une réduction du rayonnement absorbé de l'ordre de 3 % à 4 %.

Avant 1979, afin de couvrir les besoins en ECS pour une installation domestique, un débit de l'ordre de 0,015 kg/(m².s) était couramment retenu. KOPPEN et al. (1979) montrent qu'un débit réduit permet d'améliorer la stratification et WUESTLING et al. (1985) observent le lien entre débit, stratification, et F_{sol} (I.18) le taux de couverture solaire permettant de caractériser la part du solaire par rapport à l'appoint ($Conso_{complément}$). Il montre alors que lorsque la stratification est importante, l'utilisation d'un débit réduit (0,002 à 0,007 kg/(m².s)) permet d'obtenir une fraction solaire plus importante d'un tiers par rapport à un ballon dont l'eau est fortement mixée. En pratique un ballon n'est jamais fortement stratifié mais il est possible par son dimensionnement d'augmenter sa stratification, en favorisant un volume de stockage journalier. LÖF et CLOSE (1967) s'intéressent eux aux systèmes à circulation naturelle et observent que le différentiel de température entre l'entrée et la sortie des capteurs reste constant durant la journée et se situe à ~10 °C.

$$F_{sol} = \frac{Prod_{sol}}{Conso_{complément} + Prod_{sol}} \quad (I.18)$$

JORDAN et VAJEN (2001) étudient l'influence du profil de puisage en comparant le scénario type de la norme PREN 12977 et un profil statistique tenant compte des fluctuations annuelles et mensuelles. Une variation de l'ordre de 3 % est observée entre les deux scénarios due en majorité à un besoin plus important durant la période hivernale pour le scénario statistique. L'importance du maintien de la stratification dans le ballon d'ECS est aussi identifiée en comparant plusieurs débits de puisage.

La tâche 26

Une des majeures contributions aux SSC pour la maison individuelle a été réalisée au cours de la tâche 26 qui fait intervenir dix pays dont la France. Elle s'articule en trois sous-tâches (STREICHER et al. 2003). Au cours de la tâche, 21 systèmes ont été étudiés dont neuf de manière détaillée apportant un nombre conséquent de résultats et recommandations à travers les travaux de nombreux auteurs indépendants. Ces travaux sont ainsi utilisés dans ce document comme fil conducteur auxquels des références plus récentes ou plus anciennes sont greffées. Ce choix est fait afin de pouvoir apprécier l'étendue des travaux dans le domaine tout en limitant au maximum les redondances.

Dans la sous-tâche A, une méthodologie est définie pour le développement de modèles numériques et trois indicateurs sont introduits (I.19). $F_{sav,th}$ est le taux d'économie caractérisant la réduction de la consommation de l'appoint au regard d'un système de référence. Le second ($F_{sav,ext}$) ajoute la prise en compte des consommations des auxiliaires électriques. Le dernier ($F_{sav,si}$) ajoute en plus une pénalité qui est proportionnelle à l'écart entre la température de consigne et la température

19. <https://www.technologyreview.com/s/604079/the-first-us-house-to-go-solar/>

fournie. Finalement afin de pouvoir comparer la performance des SSC entre eux, un indicateur indépendant du site et du système étudié est aussi introduit : le FSC (Fractional Solar Consumption) (I.20). Il correspond à la part solaire théorique maximale que le système peut couvrir dans un cas idéal avec $I_{inc} \times A$ l'ensoleillement à la surface des capteurs. Il est donc défini comme étant la somme des productions solaires mensuelles utiles divisée par la consommation totale de l'appoint (LETZ et al. 2009). Il est alors possible de comparer entre eux plusieurs SSC, le plus performant étant celui qui a le meilleur taux d'économie ($F_{sav,therm}$ ou $F_{sav,ext}$ ou $F_{sav,si}$) pour un même FSC. De plus il est montré que le taux d'économie peut s'exprimer en fonction de FSC sous la forme d'un polynôme de second ordre permettant d'obtenir une estimation de la performance du système pour différentes conditions climatiques.

$$F_{sav,therm} = 1 - \frac{Conso_{complément}}{Conso_{ref}} \quad (I.19a)$$

$$F_{sav,ext} = 1 - \frac{Conso_{complément} + Conso_{aux}}{Conso_{ref} + Conso_{aux,ref}} \quad (I.19b)$$

$$F_{sav,si} = 1 - \frac{Conso_{complément} + Conso_{aux} + Conso_{pénalité}}{Conso_{ref} + Conso_{aux,ref}} \quad (I.19c)$$

$$FSC = \frac{\sum_1^{12} (\min(Conso_{ref,mois}, I_{inc} \times A))}{Conso_{ref}} \quad (I.20)$$

Dans la sous-tâche B, un nouveau modèle de capteur solaire détaillé est ajouté à TRNSYS, (type 132). Le rendement du capteur est défini à partir des équations quasi-dynamiques explicitées à travers I.4.2. Finalement dans la sous-tâche C (STREICHER et HEIMRATH 2007), une analyse détaillée a été réalisée sur neuf systèmes différents balayant une large variété de paramètres tels que : la surface de capteurs, l'orientation, l'inclinaison, le débit de puisage, la position des capteurs dans le ballon, la position de l'échangeur solaire, la différence de température minimale pour le chauffage et l'ECS, climat, qualité de l'enveloppe... Chaque système est modélisé dans TRNSYS et est évalué par rapport au même cas de référence à travers une analyse paramétrique. La sensibilité du SSC pour chaque paramètre est ensuite déduite des résultats. Les systèmes considérés ont tous une spécificité propre et la tâche donne ainsi une vision globale des facteurs les plus impactants pour les différents systèmes existants sur le marché.

Systèmes de la sous-tâche C : Les différents systèmes sont décrits brièvement afin de fournir un aperçu des technologies et logiques de contrôle existantes (Tab. I.1). Sur les neuf systèmes, deux sont pensés pour une application en maisons ou appartements collectifs, #9b et #19, avec respectivement trois et deux ballons. #9b comporte deux ballons pour l'ECS dont un immergé dans le ballon tampon. #19 utilise le même réseau secondaire pour le chauffage et la production ECS.

Au niveau des capteurs, la pompe solaire est dans toutes les configurations déclenchée par le différentiel de température entre la sortie des capteurs et le bas du ballon principal. Dans le cas de #12, #15, et #8, le débit est modulé afin de maximiser le rendement des capteurs. Dans #12, le choix a été fait d'utiliser deux échangeurs, un en partie basse, et un vers le centre (sous l'appoint électrique) afin d'augmenter la stratification du ballon. Alors que le système #2 utilise un unique échangeur externe à plaques, le système #19 fonctionne avec un échangeur externe à plaque couplé à un échangeur en tube stratifié interne afin de mieux répartir l'énergie et améliorer la stratification. Les autres systèmes considèrent uniquement des échangeurs tubulaires internes. Le système #15 est l'unique sys-

tème tout-en-un regroupant en une unique unité, un échangeur solaire en tube stratifié, une pompe solaire, une chaudière gaz, un échangeur à plaques pour l'ECS, et un ballon de stockage. De par son approche compacte, l'installation sur site est facilitée. Parmi les systèmes, seules les systèmes #8, #9b, et #19 assurent la logique de contrôle complète du système. Les autres systèmes sont dépendants d'un contrôleur externe pour la gestion du chauffage même si le système #12 est capable de désactiver l'appoint électrique si la pompe solaire se met en marche.

Pour la production d'ECS, cinq systèmes exploitent une production d'ECS indirecte, par l'intermédiaire d'un échangeur. #19, #15 ayant fait le choix d'utiliser un échangeur externe à plaque. Pour #19, l'échangeur assure le transfert d'énergie vers le second ballon chargé une à deux fois par jour afin de refaire le stock d'ECS. #12, #11, et #8 optent eux pour un échangeur interne couvrant la hauteur du ballon de stockage. La géométrie du serpentin est cependant optimisée uniquement pour récupérer de la chaleur en partie basse et haute du ballon. Ces options permettent de maintenir une stratification dans le ballon lors des puisages importants contrairement à une approche directe. En effet dans les autres systèmes l'ECS est puisée directement du ballon.

La couverture du chauffage par le solaire est assurée par un circuit direct pour #3a et #2. Le premier ne permet pas au solaire d'assurer simultanément le chauffage et la production d'ECS alors que le second ne permet pas de fournir aux émetteurs de l'énergie provenant en même temps de l'appoint et du solaire. Les sept autres systèmes s'orientent eux vers un chauffage indirect uniquement. Il est noté qu'aucun des systèmes étudiés ne permet l'alternance entre chauffage direct et indirect.

Évaluation globale : Les résultats des différentes approches sont décrits à travers la Fig. I.17. Il est observé que pour une surface faible de capteurs solaires (FSC faible), le système #15 obtient des performances plus importantes. Le système #3a arrive en seconde place mais nécessite une surface de capteur plus importante. Sans surprise le système pensé pour des installation collectives #19 est le moins performant. Le seul système ne permettant pas de fournir à la fois de l'énergie pour la production d'ECS et pour le chauffage (#2) fait lui aussi partie des systèmes les moins performants. Finalement, les résultats s'accordent à montrer que la performance du système augmente avec la réduction des besoins en chauffage et ce indépendamment du système considéré.

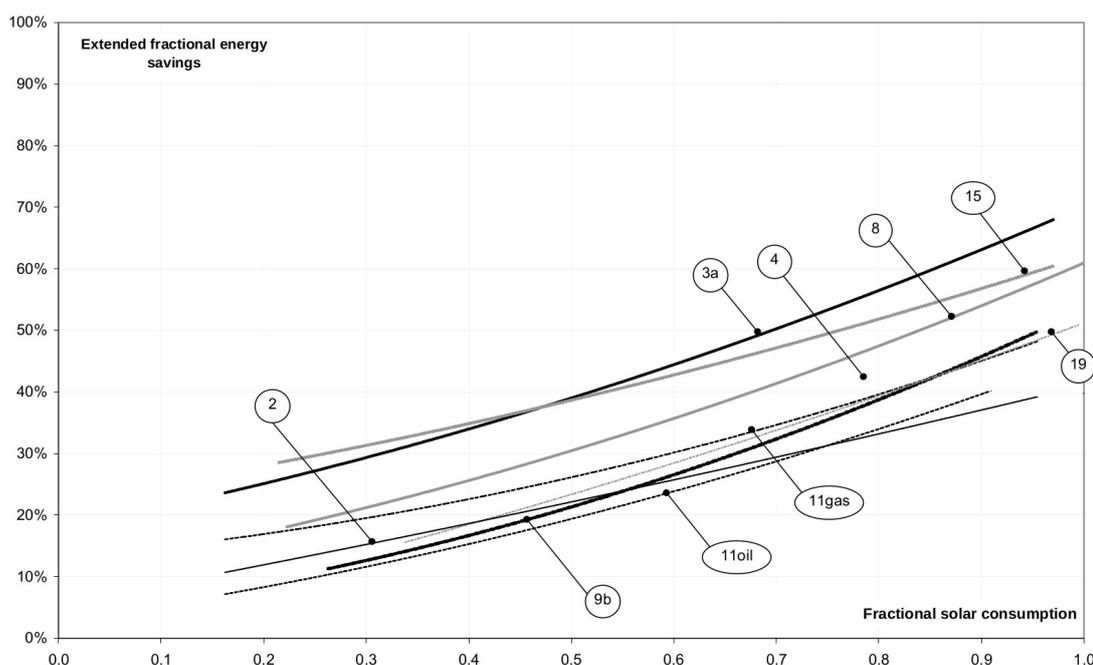


FIGURE I.17 – Comparaisons de la performance des SSC étudiés dans la tâche 26 d'après STREICHER et HEIMRATH (2007).

TABLE I.1 – Différences principales entre les différents modèles modélisés dans la tâche 26. Le CHauffage est désigné par CH et l'Eau Chaude Sanitaire par ECS.

	Type de Chaudière	Appoint électrique	CH mixte	CH et ECS ensemble	Type $Prod_{CH}$	Type $Prod_{ECS}$	Débit variable	Contrôleur unique CH et ECS	Ech_{sol} externe	Nombre d'échangeurs	Nombre de ballons	Référence
#2	Gaz / fioul	Oui	Oui	Non	Directe	Directe	Non	Non	Oui	2	1	ELLEHAUGE 2002
#3a	Gaz	Non	Non	Oui	Directe	Directe	Non	Non	Non	2	1	CHÈZE et PAPILLON 2002
#4	Gaz / fioul	Non	-	Oui	Indirecte	Directe	Non	Non	Non	2	1	SHAH 2002
#8	Gaz / fioul	Non	-	Oui	Indirecte	Indirecte	Oui (capteurs)	Oui	Non	2	1	BONY et PITTET 2002
#9b	Gaz / fioul	Oui	-	Oui	Indirecte	Directe (ballon immergé)	Non	Oui (CH)	-	0 (circulation directe)	3	PETER 2003
#11	Bois / gaz / fioul	Oui	-	Oui	Indirecte	Indirecte	Non	Non	Non	2	1	BALES 2002a
#12	Bois / gaz / fioul	Oui	-	Oui	Indirecte	Indirecte	Oui (capteurs)	Non	Non	3 (2 solaires)	1	BALES 2002b
#15	Gaz (unité compacte)	Non	-	Oui	Indirecte	Indirecte (échangeur à plaques)	Oui (capteurs et CH)	Oui	Non	2 + tube stratifiés	1	JAEHNIG 2002
#19	Gaz / fioul	Non	Oui	Non	Indirecte	Indirecte (échangeur à plaques)	Non	Oui	Oui	2 + tube stratifiés	2	HEIMRATH 2003

Travaux fondamentaux

Inclinaison et orientation : L'orientation optimale des capteurs est au sud, légèrement décalée vers l'ouest (-5° à -10°), la température plus élevée durant l'après midi pouvant expliquer ces résultats. L'inclinaison joue aussi un rôle prépondérant et les résultats suggèrent 50° pour une orientation optimale à une latitude de 45° . Cette observation est aussi reportée par SHARIAH et al. (2002) à travers une analyse paramétrique qui montre que l'inclinaison optimale est fonction de la latitude du site et est définie par $\phi + (0^\circ \text{ à } 10^\circ)$ pour les pays de l'union européenne. La plage de performance maximale est en effet montrée comme dépendante de la surface de capteurs. Une surface plus importante (relativement aux besoins), autorise une plage plus importante pour l'inclinaison optimale. À l'inverse l'ensoleillement annuel est maximal pour une inclinaison $\phi - 8^\circ$. Une analyse de l'évolution mensuelle met en évidence que réduire l'inclinaison favorise le système durant la période estivale là où le rayonnement solaire est déjà maximal. Il est donc recommandé à la fois pour diminuer les risques de surchauffe et pour améliorer la performance de favoriser une inclinaison selon la première relation. BADESCU et STAIKOVICI (2006) modélisent grâce au logiciel TRNSYS, un SSC couplé à une maison passive (selon le standard *PassivHaus*) de 150 m^2 qui par définition impose un système de chauffage utilisant le vecteur air. L'approche montre que des capteurs verticaux semblent améliorer la performance du système par rapport à des capteurs implantés en toiture sur une structure inclinée à 78° adaptée à l'optimisation des apports en hiver.

Ballon de stockage : Les différentes études menées durant la tâche 26 mettent aussi en évidence l'importance de la position des différents équipements techniques et en particulier au sein du ballon de stockage. Il est ainsi préférable de disposer en partie basse l'échangeur solaire afin de maximiser la part solaire récupérée. L'appoint doit lui être en partie haute afin de réserver le chauffage de la majeure partie du volume au solaire. Il est cependant nécessaire de ne pas le positionner trop haut afin de garantir la température de puisage : le volume réservé est donc fonction de la réactivité de l'appoint. Les systèmes #11 et #12 recommandent ainsi pour une chaudière bois de placer le retour en partie basse du ballon alors qu'il est placé en partie haute sur des chaudières gaz. Au regard de ces résultats, le volume du ballon maintenu par l'appoint doit donc être le plus faible possible. De même la température de maintien doit être minimale. Un bon réglage permet donc de maximiser la part solaire sans dégrader le confort des occupants. Dans le cas d'un système indirect, il est préférable de réserver la partie centrale du ballon pour fournir de l'énergie au circuit secondaire de chauffage. Il est aussi noté que la proximité de l'échangeur pour le chauffage risque de parasiter le volume supérieur qui doit être maintenu à une température plus importante et donc affecter les performances. La logique de contrôle étant dépendante des informations retournées par les sondes, il est recommandé de placer la sonde de température pour l'échangeur solaire à un tiers en dessous de sa position haute afin de maximiser la part d'énergie récupérée.

Relation entre capteurs et ballon : Il est identifié que l'impact des capteurs est moins important à mesure que la surface augmente (STREICHER et HEIMRATH 2007). En effet, la température du stockage augmentant les pompes tournent plus longtemps sans pour autant apporter plus d'énergie au système. En dehors de la période hivernale, remplacer la chaudière dont le rendement décroît par un appoint électrique est montré comme pertinent économiquement et énergétiquement. Une forte interaction entre surface de capteur et volume de ballon est aussi identifiée mais aucune corrélation n'est mise en avant au regard des résultats très disparates obtenus en fonction du système considéré. Il est cependant conseillé de ne pas utiliser un volume de stockage plus grand que 100 l/m^2 (capteurs). LUND (2005) montre à l'aide d'un modèle analytique journalier que le volume du ballon de stockage doit permettre de stocker de l'énergie pour quelques jours et que chercher à l'augmenter au delà n'ap-

porte pas de bénéfices. Ces résultats sont intégrés et complétés avec l'ajout de six nouveaux systèmes à travers le projet européen *CombiSol* (2007-2010) qui reprend les travaux existants (notamment ceux de la tâche 26) dans une approche plus pragmatique où chaque composant est analysé pour lister les bonnes pratiques et recommandations (THÜR 2011).

Une étude plus récente (TSALIKIS et MARTINOPOULOS 2015) identifie aussi cette interaction sur un *Net ZEB*. Le système est implémenté en Grèce en suivant la méthodologie *F-Chart* et considère un plancher chauffant et une chaudière fuel ou gaz selon l'accessibilité au réseau du site étudié. L'étude montre que le meilleur temps de retour sur investissement obtenu varie entre 4,87 ans à 6,45 ans en fonction du climat considéré. Il est aussi montré que pour toutes les configurations étudiées (12 m² à 24 m² (capteurs) et 750 l à 2000 l (ballon)) la valeur nette actuelle est toujours positive faisant du système solaire un investissement toujours favorable pour le *Net ZEB* considéré. De plus un investissement plus important permet d'améliorer la valeur nette actuelle. La prise en compte de la production des panneaux photovoltaïques et du système solaire thermique permet de couvrir de 76 % à 97 % de la consommation totale en énergie primaire. Dans le cas d'une maison efficiente (MARTINOPOULOS et TSALIKIS 2014), la même méthodologie est suivie. Les résultats indiquent un temps de retour sur investissement similaire pour une chaudière au fioul et de 8,5 ans à 10 ans lorsque une chaudière au gaz est installée. Dans les deux cas le système est capable de couvrir entre 45 % et 95 % des besoins totaux variant de 250 kWh à 3400 kWh.

Stockage saisonnier : Des systèmes moins conventionnels sont aussi traités dans la littérature. HARTL et al. (2012) décrivent ainsi une étude numérique et expérimentale sur une chaudière biomasse couplée à des capteurs solaires. Les résultats acquis hors période estivale (novembre à mai) sont encourageants avec un taux de couverture de 82 %. UCAR et INALLI (2008) évaluent le potentiel d'un stockage solaire saisonnier à travers quatre configurations couplées à une PAC pour couvrir les besoins en chauffage de respectivement 25, 250, 1000 maisons : ballon non-isolé, ballon isolé, ballon non-isolé enterré, ballon isolé enterré. En se basant sur une valeur mensuelle pour l'irradiation et de la température extérieure, il est observé que le stockage solaire enterré permet d'atteindre une meilleure couverture et que les économies financières et énergétiques sont réduites à mesure que le nombre de bâtiments alimentés par le système augmente. Des travaux similaires appliqués à une maison individuelle ont aussi été réalisés (YUMRUTAS et ÜNSAL 2012) complétant les travaux précédents en indiquant une forte dépendance entre la température moyenne du ballon enterré et le type de sol, exception faite de la période hivernale.

Optimisation de SSC

Des travaux récents cherchent à évaluer la performance des systèmes solaires à travers un processus d'optimisation. L'optimisation est le processus permettant de trouver les solutions maximisant ou minimisant un ou plusieurs objectifs et sera détaillée dans la suite de ce document. Contrairement aux approches paramétriques qui utilisent des variations successives sur un paramètre, l'optimisation explore l'espace des solutions de manière automatisée et pouvant faire varier plusieurs paramètres simultanément.

FRAISSE et al. (2009) présentent une étude comparative des différents objectifs retenus lors des études antérieures d'optimisation de système solaires pour la production d'ECS. Le système retenu est évalué successivement suivant sa performance d'un point de vue énergétique (exergie, $F_{sav,ext}$, et $F_{sav,si}$), économique (coût du cycle de vie, CCV), et écologique (émissions de CO₂ puis en combinant plusieurs objectifs en un objectif unique. L'exergie permet de quantifier la qualité d'une énergie, celle-ci diminuant au cours des transformations successives. Le travail maximum récupérable est ainsi égal à l'opposé de la variation d'exergie au cours d'une transformation. L'auteur de l'article cherche donc

à maximiser le rendement exergetique qui est le rapport entre l'exergie en sortie du système solaire (exergie fournie à l'ECS pour l'occupant) et l'exergie en entrée du système (auxiliaires électriques et irradiation solaire). Le système est décrit dans *TrnSys* et optimisé grâce à *GenOpt* en faisant varier la surface de capteurs, le volume du ballon sanitaire, et le débit du fluide au travers des capteurs. Pour les différents objectifs la surface de capteur est toujours proche de la borne maximale exception faite lorsque l'objectif est de minimiser l'investissement pour chaque kWh économisé. Au regard des résultats, l'exergie ou le taux de couverture solaire semblent favoriser une part importante d'énergie solaire mais ne permettent pas de refléter la performance réelle du système. Il est en effet mis en avant que favoriser la production solaire au lieu de favoriser la réduction de la part de l'appoint tend à sur-dimensionner le système afin d'augmenter la part solaire en période estivale. Finalement, il est mis en avant trois approches permettant d'obtenir une bonne performance tant sur la réduction du coût, de la consommation, et des émissions en CO₂ :

- Minimiser le coût sur le cycle de vie du système (CCV)
- Minimiser la consommation de l'appoint et des auxiliaires ($F_{sav,ext}$)
- Minimiser la combinaison du coût et des consommations
- Minimiser (I.21)

$$\frac{Conso_{complément} + Conso_{aux} + Conso_{pénalité}}{Prod_{sol}} \quad (I.21)$$

Bien que le système considéré ne permet pas de couvrir les besoins en chauffage du bâtiment, les remarques restent transposables aux SSC qui doivent eux aussi couvrir les besoins en ECS. DENG et al. (2013) évaluent le potentiel d'un couplage entre une PAC CO₂ et d'un SSC à travers une étude paramétrique puis une optimisation. L'optimisation est réalisée sur le CCV et il est montré que coupler la PAC avec le solaire permet d'améliorer son COP. Le temps de retour du système optimal est estimé à un peu moins de 10 ans avec un taux de couverture de 69 %. Une autre approche utilisant un appoint électrique est investiguée sur trois indicateurs (HIN et ZMEUREANU 2012, 2014) : le CCV, le cumul de l'énergie grise et de l'énergie consommée sur la durée de vie (LCE), et de l'exergie LCX. Les résultats montrent que le choix de l'objectif influence fortement les résultats autant sur la performance du système que sur son coût. Optimiser en fonction du CCV le système optimal obtenu considère un unique capteur solaire offrant un taux de couverture de seulement 21 % alors que si on considère l'objectif LCE, le taux de couverture obtenu est de 74 %. Cependant la première approche permet d'obtenir un CCV 1/3 inférieur à la solution optimisée sur le LCE. BORNATICO et al. (2012) utilisent eux le logiciel *PolySun* pour évaluer un SCC à travers F_{sol} , la consommation totale, et le coût d'investissement groupés en un unique objectif. Le système est optimisé avec deux méta-heuristiques, un essaim particulière et un algorithme génétique. La solution optimale obtenue dépend peu de l'algorithme utilisé. ASAEI et al. (2014) évaluent la performance d'un SSC (système #14 de la tâche 26) couvrant chauffage, ECS, et climatisation. L'étude considère un modèle mono-zone et trois ballons dont un pour stocker l'énergie solaire lorsque les besoins sont déjà couverts. La logique de contrôle retenue considère deux modes de fonctionnement, un mode hiver et un mode été. Durant l'été la priorité est toujours donnée à la production d'ECS alors que durant l'hiver la priorité est donnée à la production d'ECS la nuit et au chauffage le jour. Le système montre de très bonnes performances pour les quatre climats étudiés avec un F_{sol} supérieur à 70 %. Finalement plus récemment, une comparaison entre une optimisation multi-objectifs et une optimisation mono-objectif d'un SSC couplé à un Net ZEB est discutée (REY et ZMEUREANU 2016). Comme pour les autres optimisations, seuls les équipements composant le SSC sont retenus comme critères de décision. L'optimisation mono-objectif est réalisée sur la somme pondérée des différents objectifs (LCE et CCV). L'étude montre que l'obtention de solution résultant d'un

compromis entre les divers objectifs est un travail fastidieux et coûteux en temps lorsque l'approche mono-objectif est utilisée.

Bilan

Les SSC existent ainsi sous de nombreuses variations utilisant soit une chaudière, soit une PAC, soit simplement un appoint électrique. La performance de ces systèmes est très variable et de nombreux facteurs influents ont été identifiés, et leur sensibilité analysée. Il est cependant aussi observé que la majorité des études ne considèrent que les différents équipements principaux du SSC (capteurs, volume des ballons). Dans ces approches, la qualité de l'enveloppe et la logique de contrôle sont définies en amont et fixée même lors des études d'optimisation. Avec une variation de 5 ans à 100 ans (HIN et ZMEUREANU 2014; TSALIKIS et MARTINOPOULOS 2015), une forte disparité des résultats obtenus pour le calcul du temps de retour sur investissement est identifiée. Les différents travaux assument une approche plus ou moins simplifiée qui ne prend pas en compte toute la complexité inhérente à l'évaluation du coût d'une installation solaire. Il existe en effet un nombre important d'incertitudes, notamment le coût de la main d'œuvre, l'évolution des prix des énergies, le taux d'inflation, ou encore les coûts de la maintenance. De plus en fonction des pays considérés, les aides de l'état ou des régions, les taux d'intérêts, le prix des équipements et des énergies varient. L'évaluation de la rentabilité d'une installation solaire devrait aussi tenir compte de la valeur ajoutée au bâtiment (la valeur verte), des spécificités de la région, du coût de démantèlement, ainsi que du coût lié à l'environnement. Elle doit ainsi faire l'objet d'une attention particulière afin de tenir compte de l'ensemble des facteurs économiques et politiques et nécessite ainsi l'accès aux données d'acteurs du marché à partir desquelles des hypothèses peuvent être avancées. Sur l'évaluation de la performance énergétique de nombreux indicateurs sont identifiés ((I.18), (I.19), exergie). Il est aussi noté que suivant l'indicateur considéré, des précautions doivent être prises afin d'éviter une surproduction en période estivale et/ou une sur-estimation de la performance du SSC. Finalement, au cours de la tâche 26 une corrélation a été trouvée permettant de comparer entre eux les différents SSC indépendamment des conditions climatiques ou des besoins à travers l'indicateur FSC (I.20).

Des verrous et conclusions propres au sujet de ces travaux ont ainsi pu être identifiés :

- Les énergies renouvelables et donc l'énergie solaire se placent comme une alternative pertinente pour lutter contre le réchauffement climatique.
- La norme PREN 15603 amène à reconsidérer les moyens mis à mettre en œuvre pour la conception de BEPOS.
- Compenser les consommations par une production locale renouvelable n'est plus un critère suffisant, cette production doit permettre de couvrir directement une part importante des consommations du bâtiment.
- Le développement du solaire thermique stagne en Europe et les SSC sont très peu utilisés.
- Il est nécessaire de repenser la conception des SSC pour les revaloriser dans le cadre des MEPOS.
- Les SSC doivent être évalués suivant un bilan exportation / importation afin d'optimiser non pas la production solaire mais la production solaire en adéquation avec la demande.
- La conception d'une MEPOS solaire doit être le compromis entre qualité de l'enveloppe et performance du SSC.
- Afin d'évaluer le potentiel solaire, le modèle doit être détaillé pour permettre l'implémentation d'une logique de contrôle adaptée et évaluer son influence.
- La logique de contrôle doit faire partie du processus de décision

- La taille des équipements du SSC doit être réduite afin d'éviter des surcoûts et un encombrement importants.

I.5 Conception de maisons solaires à énergie positive

Cette dernière section décrit l'approche retenue dans ces travaux afin de répondre à la problématique et aux contraintes listées ci-avant. La méthodologie est développée pour répondre à la problématique de conception dans le bâtiment durant laquelle la faisabilité technique du projet est vérifiée et le planning des travaux détaillé (B).

I.5.1 Critique de l'approche actuelle dans le bâtiment

La construction d'un bâtiment est à l'origine guidée par le bon sens et l'expérience acquise dans l'optique de satisfaire aux besoins immédiats du client. Les ressources énergétiques d'origine fossile étant limitées, des réglementations sont mises en place au 20^{ème} siècle afin de sécuriser l'approvisionnement. Ces réglementations sont ensuite renforcées afin de tenir compte des changements climatiques induits par la sur-utilisation des énergies fossiles en visant à toujours plus d'exemplarité. Le secteur du bâtiment reste cependant encore aujourd'hui le plus gros consommateur d'énergie.

Parallèlement les progrès de l'informatique ont permis le développement d'outils techniques et économiques, marquant une évolution dans le processus de conception. Au début réservée à une élite, sa démocratisation a permis de l'exploiter dans le domaine de l'énergétique du bâtiment et plus particulièrement dans les bureaux d'études. Cependant les habitudes sont fortement ancrées et l'outil numérique est aujourd'hui principalement employé à travers une approche par essai/erreur. À partir d'un cas de référence généralement défini par l'expérience, un ensemble de variations sont introduites à l'aide d'itérations successives. Ce processus est coûteux en temps humain et ne permet pas de valoriser la puissance de calcul disponible. Elle offre pourtant la possibilité d'explorer un nombre important de solutions et de vérifier des suppositions plus rapidement. De plus, les réalités économiques et la forte concurrence lors des appels d'offres amènent les bureaux d'études à répondre de plus en plus rapidement aux marchés dont la complexité et la combinatoire augmentent parallèlement aux réglementations.

Ainsi, afin de pouvoir répondre aux nouvelles contraintes du marché, le temps humain doit être valorisé pour des tâches cognitives, et le temps machine assujéti aux tâches répétitives. En effet la miniaturisation, la finesse de gravure, et l'augmentation du nombre de transistors par processeur a permis une croissance exponentielle de la puissance de calcul. L'arrivée des processeurs multi-cœur a encore repoussé les limites de calcul, si bien que le développement d'une méthodologie basée sur le temps machine est tout à fait pertinente. Dans cette optique il est nécessaire d'automatiser le processus de décision en phase de conception grâce à l'intelligence artificielle. Cette approche nécessite cependant le développement d'une méthodologie adaptée.

I.5.2 Approche proposée

La construction d'un bâtiment est par définition multi-objectifs, elle fait intervenir un nombre conséquent de paramètres que ce soit sur l'enveloppe, les systèmes, la logique de contrôle, le climat, ou encore le comportement des occupants. Elle doit de plus à minima satisfaire un cadre réglementaire au niveau acoustique, thermique, et mécanique. Par extension la construction d'une MEPOS solaire est donc aussi multi-objectifs.

Au cours de la première section, il a été mis en évidence la nécessité de s'émanciper des énergies fossiles, dont la sur-utilisation est responsable des fortes émissions de CO₂. Dans cette optique, un

cadre réglementaire a évolué et des approches associatives ont aidé à son développement notamment avec la mise en place de labels certifiant une qualité supérieure favorisant le recours aux énergies alternatives. L'état est aussi un acteur clé à travers la mise en place d'une coopération internationale et de mesures incitatives : la politique de rachat de l'énergie électrique produite localement ou encore les aides financières obtenables lors de travaux de rénovation ou d'exemplarité énergétiques. Les actions combinées de tous ces intervenants permettent aujourd'hui d'être à l'aube d'un cadre réglementaire européen (PREN 15603) sur la MEPOS dont chaque pays membre devra s'inspirer pour la définition de leur nouvelle réglementation thermique nationale. Bien que la norme ne soit pour l'heure qu'un brouillon, les axes principaux sont d'ores et déjà définis. La norme s'articule autour de quatre objectifs péremptifs : assurer une performance minimale sur l'enveloppe, assurer l'efficacité des systèmes installés, assurer un bilan énergétique global positif, et assurer une part minimale d'énergie renouvelable pour la production locale.

Ces travaux cherchent ainsi à travers une approche innovante à valoriser l'énergie solaire thermique aussi bien sur le chauffage que sur l'ECS afin d'assurer la construction de maisons à énergie positive ayant une empreinte énergétique sur sa durée de vie la plus faible possible. Comme le souligne l'association *négaWatt* « L'énergie qui pollue le moins est celle que l'on ne consomme pas. ». De plus comme l'indique la norme PREN 15603 à travers l'indicateur RER, la consommation locale en énergie primaire devra être fortement couverte par des énergies renouvelables et l'évaluation de ce critère est réalisée par vecteur énergétique. L'approche choisie à travers ces travaux est donc la minimisation de la consommation d'énergie non renouvelable en couvrant au maximum la demande énergétique par le solaire thermique. La production d'énergie photovoltaïque est considérée comme complémentaire et doit permettre de couvrir les besoins électriques de plus en plus importants dans les maisons individuelles. Il est évalué à la fois les besoins de chauffage et d'ECS, mais aussi les charges internes (éclairage et électro-domestiques), qui représentent une part importante de la consommation des MEPOS. Les autres objectifs de la norme PREN 15603 sont aussi pris en compte même si plus de liberté est prise afin d'explorer l'ensemble des solutions envisageables.

Ainsi la méthodologie retenue cherche à caractériser le bâtiment et ses systèmes conjointement afin d'offrir une cohésion de l'ensemble. En effet la norme restreint fortement l'exploratoire en imposant d'une part une enveloppe performante et d'autre part une limitation de la consommation sur site. Il apparaît pour l'auteur que ces contraintes relèvent d'une volonté de sobriété énergétique afin de garantir une empreinte énergétique la plus faible possible. Cependant dans le cas d'une maison solaire il est intéressant d'explorer les combinaisons complémentaires possibles qui pourraient offrir des alternatives cohérentes, sans aller à l'encontre de la sobriété. Finalement ces travaux intègrent l'énergie primaire comme indicateur de référence pour la définition du bilan positif comme décrit par la 4^{ème} directive de la prochaine norme européenne. La méthodologie retenue impose ainsi un bilan positif sur les quatre usages considérés : le chauffage, la production d'ECS, la consommation de l'électro-ménager, et la consommation de l'éclairage.

Parallèlement, il a été mis en évidence que le solaire thermique est une technologie ancienne permettant de valoriser une énergie quasi-infinie. Les bâtiments sont ainsi aujourd'hui pensés pour maximiser la part solaire passive durant la période de chauffage afin de limiter au maximum sa consommation. Le solaire actif est aussi fortement utilisé dans le neuf comme dans la rénovation afin de limiter les consommations nécessaires à la production d'ECS. Cependant les SSC, développés pour couvrir à la fois les besoins en ECS et le chauffage restent principalement une solution pour la rénovation. De nombreux systèmes existent sur le marché et une majorité ont été étudiés à travers la tâche 26 et le projet *CombiSol*, mais peu de travaux cherchent à déterminer la performance pouvant être obtenue pour des MEPOS. De plus parmi les travaux existants, une partie évalue la performance des SSC à travers des outils simplifiés tels que *F-chart* qui ne permettent pas de tenir compte de la dynamique

du système, ni des spécificités du SSC retenu. D'autres approches utilisent des outils permettant une approche détaillée comme *TrnSys*. Cependant même dans ces approches, l'algorithme de contrôle reste secondaire et les critères de décision sont liés aux équipements solaires uniquement (surface de capteur, volume du ballon...). Finalement, la performance est évaluée globalement, ne faisant pas de distinction entre la part solaire apportée au chauffage et la part solaire apportée à la production d'ECS.

La performance d'un SSC innovant est ainsi caractérisée à la fois sur le chauffage, et sur la production d'ECS, à travers une approche multi-objectifs. De plus le système solaire, l'enveloppe du bâtiment, et la logique de contrôle seront évalués simultanément afin d'explorer les différentes combinaisons existantes permettant d'atteindre un bilan positif. Dans cette optique, une modélisation détaillée du SSC et de son algorithme de contrôle est nécessaire. Le parti pris est le suivant : les contraintes techniques sont propres à chaque site, chaque industriel, mais aussi à chaque client dont les attentes varient fortement. Partant de ce constat, il apparaît plus intéressant de proposer un ensemble de solutions techniquement différentes mais répondant toutes aux contraintes de la MEPOS à travers une approche multi-objectifs. En effet une approche mono-objectif contraint à l'obtention d'une solution unique. Les limitations propres aux approches mono-objectif et multi-objectifs sont discutées plus amplement dans le chapitre III de ce manuscrit.

I.5.3 Bilan

Ces travaux s'inscrivent donc en phase de conception en proposant une méthodologie exploratoire permettant d'identifier des combinaisons pertinentes entre les équipements du SSC, la logique de contrôle, et l'enveloppe du bâti. La méthodologie s'inspire des contraintes décrites à travers la norme PREN 15603 afin d'aider au développement des BEPOS solaires adaptés aux contraintes du secteur du bâtiment et plus particulièrement de la maison individuelle. S'appuyant principalement sur l'intelligence artificielle et l'automatisation, elle permet d'optimiser le temps machine et de revaloriser le temps humain disponible pour chaque marché.

Dans un premier temps, le choix des outils est introduit à travers une étude comparative. Suit une description du bâtiment de référence et des développements réalisés sur le SSC à travers une présentation des équipements du système et d'une description détaillée de la logique de contrôle implémentée. Le chapitre II permet ainsi de préciser les scénarios d'usages tels que le profil de paysage retenu mais aussi d'évaluer a priori la performance du SSC pour différentes configurations et différents climats à travers une étude paramétrique.

Le troisième chapitre décrit la méthodologie d'aide à la décision retenue. Il y est présenté dans un premier temps les méthodes d'aide à la décision existantes mais aussi les outils complémentaires comme l'analyse de sensibilité ou les modèles de substitution. Dans un second temps l'optimisation multi-objectifs est présentée et une analyse circonstanciée des méthodes existantes est réalisée afin de justifier le choix de la méthodologie retenue.

Finalement le quatrième chapitre explicite la méthodologie d'optimisation retenue à travers deux cas d'étude. Le processus complet d'aide à la décision est ainsi illustré en parallèle pour des conditions climatiques distinctes, Bordeaux et Strasbourg. L'ensemble des solutions obtenues par le processus d'optimisation multi-objectifs est alors discuté et permet de mettre en avant de nombreuses remarques pertinentes pour aider au développement des SSC.

MODÉLISATION DÉTAILLÉE D'UN SYSTÈME SOLAIRE COMBINÉ INNOVANT

L'objectif de ces travaux a été explicité à travers le chapitre précédent. Il est proposé de réaliser un outil d'aide à la décision pour explorer les combinaisons pertinentes pour la conception de maisons solaires à énergie positive. Il est ainsi nécessaire de présenter le bâtiment et le potentiel du système solaire combiné retenu. Ce chapitre introduit ainsi le couplage entre une maison à énergie positive et un système solaire combiné. Dans un premier temps, le choix de la modélisation est argumenté et les outils retenus explicités. Dans un second temps, le bâtiment et les scénarios de référence sont introduits, puis, le système solaire combiné est décrit. Son fonctionnement général et les divers équipements le constituant sont discutés, puis la logique de contrôle proposée est détaillée. Finalement une étude paramétrique est réalisée afin d'évaluer le potentiel du système solaire combiné en fonction de différents scénarios et de différents choix techniques.

II.1 Modélisation détaillée d'un système solaire combiné

Il existe principalement deux approches permettant d'évaluer le potentiel d'un bâtiment ou d'un système : l'approche par expérimentation et l'approche par modélisation. Cette première section décrit ainsi dans un premier temps les deux méthodes puis les outils retenus pour l'évaluation du potentiel sont présentés.

II.1.1 Le choix de la modélisation

L'expérimentation

L'approche par expérimentation est la seule manière d'évaluer un système dans des conditions réelles. Elle est ainsi toujours nécessaire afin de confronter les résultats obtenus par la simulation. Le fonctionnement d'un bâtiment et de ses systèmes est en effet un système physique complexe et instationnaire où de nombreuses incertitudes entrent en jeu :

- Conditions externes : température, rayonnement solaire...
- Conditions internes : occupants, équipements...
- Performance de l'enveloppe
- Performance des systèmes

Contrairement à l'expérimentation, la prise en compte de tous les paramètres dans une modélisation est impossible et il est nécessaire de faire des simplifications. Par exemple il peut être admis des scénarios types pour l'occupation, une pose uniforme de l'isolant, ou encore une équilibrage parfait des réseaux. La simulation permet alors de vérifier que les hypothèses faites sont satisfaisantes au regard de l'objet de l'étude.

L'expérimentation permet aussi d'observer un phénomène et de réaliser des modifications successives afin de mieux le comprendre. Il est ainsi possible dans certains cas d'obtenir une relation permettant de simplifier un problème complexe grâce à l'observation et la prise de mesures pour différentes conditions de fonctionnement. Ces relations empiriques sont souvent utilisées dans le bâtiment en particulier lorsque le modèle détaillé nécessite la définition de trop nombreux paramètres qui ne sont pas toujours disponibles. Par exemple, le rendement des capteurs dans ces travaux (I.15) est défini suivant une relation empirique. Chaque capteur a une géométrie propre mais grâce à des mesures expérimentales dans des conditions limites identiques, un comportement caractéristique a été identifié. La relation empirique trouvée permet alors d'approximer le rendement de tous les capteurs solaires thermiques sans devoir tenir compte des spécificités de leur géométrie.

La modélisation

La modélisation est un outil puissant qui dépend cependant intrinsèquement du niveau de détail retenu pour chaque composant. Bien que possible en théorie, une modélisation ne permet pas de simuler la complexité inhérente à la réalité comme le souligne parfaitement *Georges Box* :

« *All models are wrong but some are useful* »

Une modélisation est toujours une approximation simulant de manière plus ou moins précise un système dans des conditions imposées. Un modèle est donc représenté par des systèmes d'équations qui admettent des hypothèses et ne tiennent compte que d'une partie des phénomènes. Un niveau important d'expertise est ainsi nécessaire afin de déterminer le niveau de détail des modèles permettant de représenter au mieux le système afin d'éviter des erreurs numériques ou des résultats erronés. Il

est aussi clair que les installations sont en réalité imparfaites et même dans l'hypothèse d'une modélisation complète de l'ensemble des phénomènes il restera un écart entre le modèle et la réalité car des facteurs ne sont pas pris en compte : les imperfections techniques, les malfonctionnements, ou les erreurs d'installations. Le système considéré peut en effet comporter des fuites, des problèmes de raccord, un équipement peut avoir des caractéristiques différentes que ceux de sa fiche technique... Une modélisation est donc une représentation plus ou moins précise de la réalité admettant des conditions limites contrôlables.

Bilan

L'expérimentation comme la modélisation reviennent à interpréter des valeurs d'intérêt à partir d'informations récoltées sur les conditions de fonctionnement et sur les conditions limites. Les deux approches sont complémentaires et comportent des avantages et des inconvénients. L'expérimentation permet d'analyser un système dans des conditions réelles et peut être utilisée pour confronter les résultats théoriques à la réalité. Elle est cependant coûteuse et complexe à mettre en place. À l'inverse, la modélisation est contrainte par des systèmes d'équations mais offre une liberté plus importante sur les conditions de fonctionnement. L'ensemble des paramètres étant contrôlable, la modélisation offre l'opportunité d'évaluer de multiples configurations. Elle est donc particulièrement adaptée pour des études cherchant à évaluer les effets de la variation d'un ou plusieurs paramètres comme les études paramétriques ou l'optimisation : l'approche par modélisation est donc le choix le plus pertinent pour répondre à la problématique de ces travaux.

Cette conclusion nécessite cependant d'être ajustée. Bien que seule la simulation puisse répondre à ces questions, l'expérimentation est complémentaire et permet de vérifier le modèle numérique. L'approche la plus correcte serait donc de réaliser un modèle numérique pour ensuite le valider à travers une approche expérimentale. Une fois validé, le modèle peut être utilisé pour étudier l'impact de diverses variations. Ces travaux n'intègrent cependant pas de validation expérimentale mais, comme détaillé ci-après, les modèles retenus ont fait pour la plupart l'objet de vérifications analytiques.

II.1.2 Le choix de l'outil de modélisation

Les contraintes de modélisation

Ces travaux cherchent à évaluer la performance d'un SSC à l'échelle d'une maison individuelle en particulier à travers le développement et l'évaluation d'un algorithme de contrôle détaillé. Il est donc nécessaire de sélectionner un outil permettant un accès complet aux différents composants du modèle. Ce contrôle est nécessaire pour permettre l'analyse des interactions induites par des variations au niveau du composant et le fonctionnement global du système au niveau du bâtiment. De plus, l'algorithme étant en développement le processus est dans un premier temps fortement itératif. L'outil sélectionné doit par conséquent permettre de modifier, ajouter, et supprimer rapidement et simplement des composants. Finalement le problème à modéliser est un problème multi-physique et l'outil doit être adapté à la modélisation d'un système hydraulique (solaire), d'un système aérodynamique (ventilation), d'un algorithme de contrôle (régulation), le tout couplé à un modèle thermique (bâtiment).

Les outils existants

Au fil des années de nombreuses bibliothèques ou logiciels ont été développés. Parmi ces approches certaines cherchent à modéliser de manière très précise la dynamique de l'échange au niveau de capteurs alors que d'autres se focalisent sur une estimation grossière des performances. Les deux

approches permettent d'évaluer de manière plus ou moins précise un système solaire pour différents pas de temps.

TRNSYS : Aujourd'hui en version 18 (KLEIN 2017) il est développé par l'université de Madison (USA). Disponible dès 1975 (version 6), le logiciel est développé à l'origine pour des applications solaires et reste aujourd'hui encore le plus utilisé. À partir de 1994, la version 14 regroupe cinq programmes sous le méta-programme *TRNSHELL* :

- TRNSYS : moteur de calcul et bibliothèque de base
- PRESIM : une interface graphique pour la composition des modèles
- ONLINE : visualisation des résultats durant la simulation
- PREBID : aide à la construction de bâtiment
- TRNSED : un éditeur de texte pour créer des modules

De par son approche modulaire, le logiciel peut être étendu simplement afin de répondre aux nouveaux besoins. Cette approche offre ainsi la possibilité aux utilisateurs d'ajouter de nouveaux modules, expliquant d'une part sa large bibliothèque, et d'autre part sa longévité. Finalement, il propose aussi le couplage avec divers logiciels tels que *MATLAB* ou *GenOpt*. Après 40 ans d'existence le logiciel profite aujourd'hui d'une des plus grande bibliothèque et permet de modéliser tout type de procédé thermique ou électrique pour différentes échelles que ce soit un bâtiment ou un simple contrôleur. L'IEA l'utilise par exemple à travers la tâche 26 et a participé à l'amélioration de sa bibliothèque (PERSERS et BALES 2002).

Simulink : Développé par *MathWorks*, c'est un outil de programmation graphique permettant de créer des modèles complexes par association de blocs causaux. Il est fortement intégré avec le logiciel *Matlab* qui s'occupe de résoudre les systèmes d'équations. Cette intégration permet aussi à *Simulink* d'accéder aux nombreuses fonctions de l'environnement *Matlab*. Développé dans les années 1990, la bibliothèque couvre aujourd'hui de nombreux domaines de l'ingénierie. Comme *TrnSys*, il permet de simuler des systèmes linéaires et non-linéaires. Il peut de plus générer du code source C, permettant d'embarquer le modèle développé dans un procédé pour un fonctionnement en temps réel. MOSALLAT et al. (2013) l'utilisent afin de modéliser un système solaire pour le chauffage d'un bâtiment d'entrepreneuriat social et comparent les résultats obtenus par l'approche dynamique à ceux d'une approche statique obtenue avec le logiciel *RETScreen*¹. Les résultats montrent que la performance du système solaire est sur-évaluée avec l'approche statique.

EnergyPlus : Développé par le département de l'énergie des États-unies (DOE), c'est un logiciel « open source » permettant de simuler la consommation de l'énergie dans les bâtiments. Comme *TrnSys*, il utilise un pas de temps fixe qui doit représenter un énième d'heure. Il permet soit de simuler le bâtiment avec un système idéal, soit de le coupler avec des systèmes en proposant un large choix de solutions techniques. *EnergyPlus* propose une interface graphique de base même si son utilisation en particulier pour modéliser des systèmes reste complexe. Pour cette raison des interfaces plus conviviales ont été développées comme *OpenStudio*, *Design Builder*, ou *Simergy*. Un plugin pour le logiciel de dessin 3D *Sketchup* a aussi été développé et permet d'importer directement dans *EnergyPlus* le bâtiment modélisé.

1. www.retscreen.net

IDA-ICE : Développé par *EQUA Simulation AB*, c'est un logiciel permettant le calcul des consommations mais aussi du confort intérieur avec un pas de temps variable (KALAMEES 2004). Dans cette optique il offre une solution tout-en-un avec une interface et des solutions modernes. Le logiciel comprend un moteur de calcul (IDA), un éditeur 3D, et un outil de post-traitement permettant d'évaluer les résultats à travers des courbes classiques ou bien des animations 3D du bâtiment et des systèmes. L'interface propose trois niveaux de contrôle afin de couvrir les besoins de différents types d'utilisateurs. Le bâtiment et ses systèmes peuvent ainsi être modélisés, soit à travers le suivi d'étapes simples, soit par association de composants, soit en créant de nouveaux composants grâce à un langage de programmation équationnel intégré.

Modelica : *Modelica* est un langage de programmation libre et ouvert développé pour répondre aux contraintes de la modélisation multi-physique. Il a été pensé pour être intuitif en offrant une approche équationnelle et orientée objet au développeur (WETTER et al. 2016). L'approche objet permet d'encapsuler un ensemble de données dont l'accès est restreint par une interface publique : l'API (Application Programming Interface). Un modèle est ainsi une combinaison d'un ensemble de sous-modèles (composition) où certains sous-modèles peuvent être améliorés afin de leur ajouter une spécialisation (héritage). Cette approche permet alors une forte réutilisation des modèles déjà existants tout en simplifiant l'ajout de nouvelles fonctionnalités ou le couplage des deux. Finalement, le langage est acausal (Déf. 3), permettant au modèleur de rapidement créer des prototypes de systèmes complexes sans devoir à chaque modification réécrire l'ensemble des systèmes d'équations. Il est cependant toujours possible de définir explicitement un composant comme étant causal en héritant de la classe *Bloc*.

Définition 3 (Acausal)

Un modèle est dit acausal lorsque le sens de la définition d'une équation n'est pas imposé (Fig. II.1). Le solveur va ainsi déterminer par lui-même les paramètres dont il connaît la valeur et réécrire les systèmes d'équations afin d'exprimer les inconnues à partir des valeurs connues. À l'inverse un système causal nécessite que l'inconnue soit isolée a priori par le programmeur.

Méthodes de calculs : Elles permettent d'estimer le potentiel solaire mais ne fournissent pas d'informations sur la dynamique du système. D'après DUFFIE et BECKMAN (1980) il existe trois catégories de méthodologie, issues soit :

1. de corrélations entre caractéristiques des capteurs et données météorologiques
2. de corrélations à partir de nombreuses simulations détaillées
3. du calcul des journées typiques pour un ciel clair et nuageux pondérées en fonction de la couverture nuageuse moyenne du site.

La méthode la plus répandue, *F-CHART*, permet d'estimer la performance d'un SSC (vecteur air ou eau) ou bien d'un système produisant uniquement de l'ECS. la méthode utilise une corrélation établie sur la base de systèmes de références pour lesquels des variations paramétriques ont été réalisées. La méthode nécessite la connaissance des conditions extérieures comme la température et de l'ensoleillement sur une base mensuelle et permet d'obtenir l'indicateur F_{sol} . CUADROS et al. (2007) montre que cette méthode sur-estime la performance du système solaire pour la production d'ECS et propose une autre méthodologie. La nouvelle approche est plus performante lorsque les besoins d'ECS sont importants en particulier pour des capteurs sous-vide. Cependant lorsque le puisage journalier est inférieur à ~ 500 l, l'écart entre les différentes méthodes est moindre. Finalement l'ensemble des méthodes évaluées sont comparées avec un logiciel de simulation dynamique : *TrnSys*. Il est montré

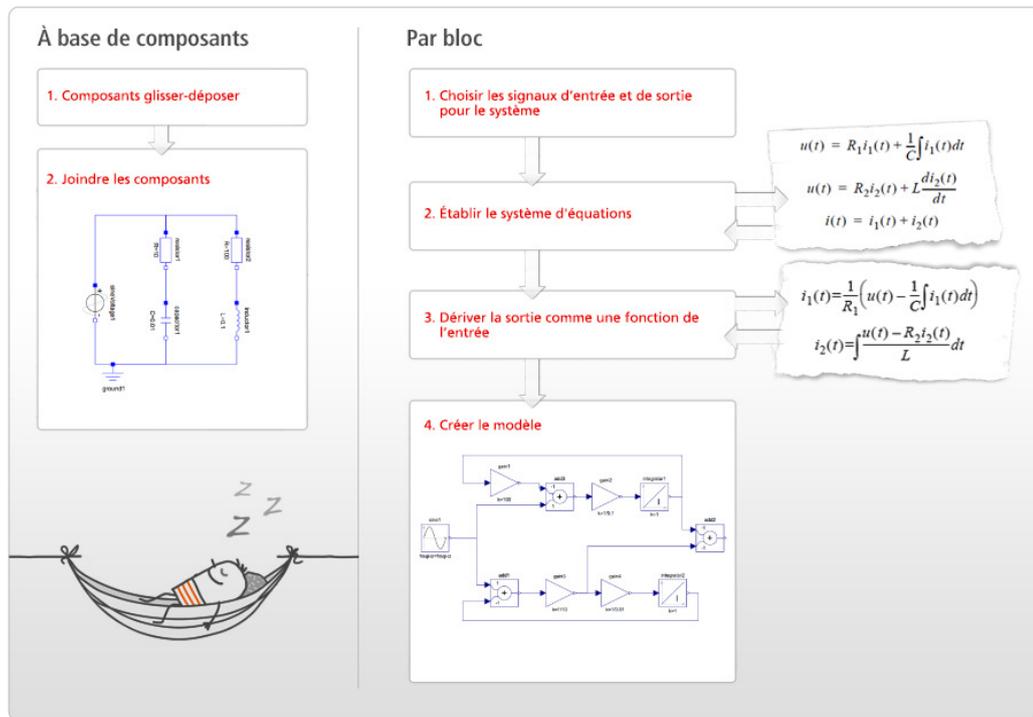


FIGURE II.1 – Différences entre modélisation acausale (par composant) et causal (par bloc) (Wolfram).

que toutes les approches sur-estiment le potentiel solaire, en particulier lorsque des capteurs plans vitrés sont considérés.

Bilan : Il existe ainsi de nombreux logiciels, langages, et méthodes, permettant d'évaluer la performance d'un SSC. L'approche retenue cherchant à caractériser de manière détaillée l'algorithme de contrôle, les méthodes issues de corrélations sont écartées au profit d'une approche par simulation dynamique. Parmi les choix disponibles, le logiciel *EnergyPlus* est aussi écarté à cause de sa complexité. Bien qu'il soit relativement aisé de définir l'enveloppe, la logique de contrôle et l'ajout de système n'est pas intuitive.

Ces travaux nécessitant la réalisation de nombreuses modifications durant la phase de développement, le choix a été fait de retenir *Modelica* (3.2.2) pour son approche acausale facilitant le processus itératif de construction tout en offrant une liberté de détail sur chaque composant. *Modelica* n'étant qu'un langage de modélisation, il est aussi retenu *Dymola* (Dynamics MODELing LABORatory) et la bibliothèque *Buildings* décrits ci-après.

II.1.3 Outils complémentaires

Dymola

Dymola est une suite de logiciels développée par *Dassault Systèmes* permettant de simplifier le développement de modèles numériques grâce au langage *Modelica*. Il offre une interface graphique permettant de connecter les modèles entre eux de manière intuitive et un outil de post-traitement afin d'évaluer rapidement les résultats. Il propose aussi de nombreuses fonctions simplifiant le développement afin de se focaliser sur le problème physique à modéliser :

- *Dymosim* : un large choix de solveurs pour intégrer les modèles
- Un format texte permettant la coopération, le « versionnage », et la construction dynamique.
- Un langage de script interne permettant l'automatisation.

- Le « refactoring » permettant de renommer de manière dynamique une variable.
- Le « drag and drop » permettant de composer et connecter rapidement des modèles.
- Le support de la parallélisation.
- La création de FMU (Functional Mock-up Unit).
- La génération de modèles autonomes.
- ...

Buildings

Le couplage de *Modelica* et de *Dymola* permet le développement itératif nécessaire à notre problème tout en offrant un contrôle total sur chaque partie du modèle. Bien que largement utilisé dans l'industrie du transport, le langage *Modelica*, en pleine croissance dans le secteur du bâtiment, est cependant encore peu utilisé. De nombreuses bibliothèques « open source » ont été développées dont la liste peut être trouvée sur le site officiel de l'association *Modelica*.

Ces travaux s'appuient sur la bibliothèque Buildings (WETTER et al. 2014) développée par le laboratoire national Lawrence Berkeley (LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory) dont le développement est le plus avancé et le plus actif. C'est une bibliothèque libre et ouverte, développée pour la modélisation des systèmes du bâtiment (hydraulique, aéraulique, électrique, thermique...) et son développement est toujours actif. Avec le développement important d'outils autour de *Modelica*, l'IBPSA (International Building Performance Simulation Association) développe une bibliothèque de composants basiques pour l'ensemble de la communauté de l'énergétique du bâtiment : *modelica-ibpsa*². La bibliothèque n'a pas vocation à remplacer les différentes initiatives existantes mais à proposer un socle commun de composants afin de simplifier le développement, et le couplage entre les différents outils. Initiés à travers les travaux de l'Annexe 60 (WETTER et al. 2015), les développements continuent dans le cadre du projet 1³.

DymTK

Afin de permettre la simulation de nombreux modèles de manière concurrente, une bibliothèque, *DymTK*, est développée à l'aide du langage de programmation *Python*. En plus de permettre la simulation en parallèle de nombreux modèles, elle propose une API permettant de réaliser des traitements en amont et en aval des simulations. *DymTK* ajoute une couche d'abstraction à l'utilisateur afin que le lancement et le traitement des données soit simplifié et est basée sur principalement deux bibliothèques, *BuildingsPy* et *DyMat*. La bibliothèque *Buildingspy* est développée par le LBNL et permet d'interagir avec le langage de script de *Dymola* pour modifier et simuler des modèles sans l'interface graphique. La bibliothèque *DyMat*⁴ permet d'extraire les données des fichiers de sorties de *DymoSim* qui utilisent une version modifiée du format *.mat*.

II.1.4 Bilan

Afin de pouvoir répondre à la problématique, le choix a été fait de retenir une approche par modélisation et d'utiliser le langage *Modelica* pour simuler le comportement du SCC. D'autres outils complémentaires ont aussi été utilisés ou développés afin d'automatiser l'évaluation de nombreux modèles de manière concurrente. Les outils étant définis, la section suivante introduit le cas d'étude.

2. <https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa>

3. <https://ibpsa.github.io/project1/>

4. <https://www.j-raedler.de/projects/DyMat/>

II.2 Application à la modélisation du cas d'étude

Cette section introduit le cas d'étude et les choix faits au niveau de la modélisation. Dans un premier temps le bâtiment et ses scénarios sont présentés puis la pertinence du modèle retenu est. Ensuite, le SSC ainsi que les divers équipements le composant sont détaillés. Finalement le fonctionnement de la logique de contrôle proposée est décrit de manière approfondie.

II.2.1 Modélisation de l'enveloppe

Le bâtiment est une maison de plain-pied (Fig. II.2) avec une surface habitable de 98,4 m². Elle comporte trois chambres, une cuisine/salon, et un local technique où se trouvent les équipements du système solaire combiné (SSC). En plus de l'espace chauffé, les combles et le vide sanitaire ont été modélisés comme des conditions limites (Fig. II.3). Enfin une fenêtre de toit est ajoutée dans le salon afin d'améliorer le confort lumineux (Tab. C.3).

Dans le cadre de ces travaux un couplage fort entre bâtiment, systèmes, et algorithme de contrôle est envisagé. Dans cette optique, un modèle mono-zone validé à travers une suite de tests issus de l'ASHRAE est retenu pour modéliser le bâtiment (NOUIDUI et al. 2012 ; WETTER et al. 2011). Ce choix est discuté ci-après en comparant les résultats de l'approche mono-zone à une approche multi-zonale réalisée à l'aide d'Energy Plus. Ainsi la température dans l'ensemble de la zone chauffée est considérée comme uniforme.

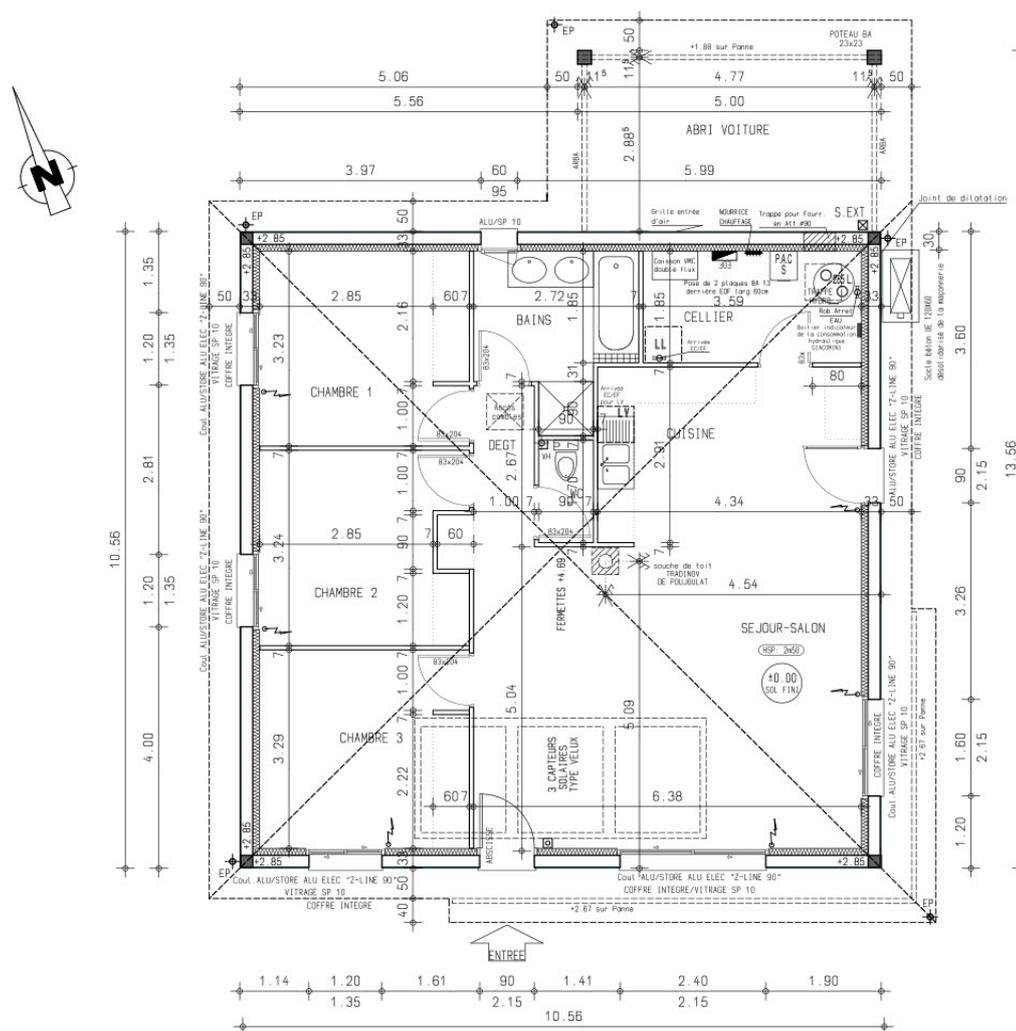


FIGURE II.2 – Plan du bâtiment utilisé à travers ces travaux.

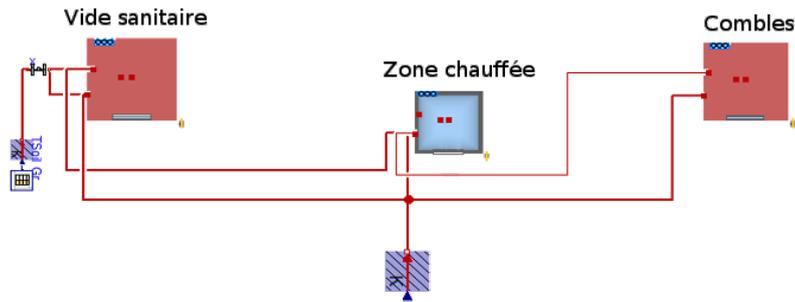


FIGURE II.3 – Représentation du bâtiment sous Modelica.

Les caractéristiques thermiques des parois opaques sont décrites en fonction de leur orientation (Tab. II.1) et une description détaillée et exhaustive est disponible en annexe (Tab. C.5). La composition retenue permet ainsi d'obtenir une enveloppe très performante.

TABLE II.1 – Description de la performance des parois opaques.

	Murs	Plancher	Plafond	Unité
U	0,174	0,110	0,123	W/(m ² .K)
Surface	91,17	98,40	97,06	m ²
U × Surface	15,864	10,824	11,938	W.K

Déperditions à travers les fenêtres

Les vitrages utilisés sont des vitrages doubles avec une lame d'air ou d'argon et une couche faiblement émissive est ajoutée pour les vitrages des parois verticales. Il est considéré pour l'ensemble des vitrages, une composition similaire (Planilux SGG 4 mm - Argon - Planitherm XN 4 mm), exception faite de la fenêtre de toit.

Une attention particulière a été apportée à la description des vitrages afin d'être cohérente avec les fiches techniques et satisfaire les normes de calculs implicites de la bibliothèque *Buildings*. En effet, le modèle de vitrage de la bibliothèque *Buildings* sépare le calcul de l'énergie transmise en conductif et en radiatif : les caractéristiques des vitrages doivent alors être renseignées de manière détaillée. Cependant, les fabricants fournissent seulement les caractéristiques globales : le coefficient de transmission thermique U_g et le facteur solaire g . Le logiciel *Windows 7.4* a donc été utilisé afin d'obtenir la composition détaillée des vitrages retenus.

Dans un premier temps, le vitrage est construit à partir de la composition décrite dans sa fiche technique puis les coefficients caractéristiques sont calculés. Afin de pouvoir comparer avec les données fabricants, les conditions limites issues des normes européennes sont implémentées dans le logiciel (Tab. II.2). En effet, le choix des conditions limites affecte fortement le résultat et il est observé une variation moyenne de 20 % entre les normes européennes et américaines (RDH 2014).

TABLE II.2 – Détail du calcul du U_g et du g selon NF EN 673 (2011) et NF EN 410 (2011).

	T_{int}	T_{ext}	h_c^{int}	h_c^{ext}	Ensoleillement
	[K]	[K]	[W/(m ² .K)]	[W/(m ² .K)]	[W/m ²]
Calcul du U_g	20	0	3,6	25	-
Calcul du SHGC	30	25	3,6	25	500

Finalement, la bibliothèque *Buildings* ne permettant pas l'ajout de ponts thermiques aux vitrages, le choix a été fait de les intégrer dans le coefficient thermique caractéristique du cadre, U_f en considérant les coefficients de transmission thermique linéique (ψ en $W/(m.K)$) suivants :

- $\psi_{mur/appui\ fen\hat{e}tre} = 0,07$
- $\psi_{mur/seuil\ porte\ fen\hat{e}tre} = 0,14$

Une description détaillée et exhaustive de la composition des fenêtres est disponible en annexe (Tab. C.2, Tab. C.3, et Tab. C.4).

Description des infiltrations

Les infiltrations ont été définies en utilisant une perméabilité de $0,4\text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$. Le calcul tient compte de la somme des surfaces dites froides correspondant à la somme des surfaces donnant vers l'extérieur à l'exception du plancher bas (II.1).

$$\begin{aligned} \text{Infiltrations} &= 0,4 \times (\text{Parois}_{\text{verticales}} + \text{Parois}_{\text{velux}} + \text{Plafond}) \\ &\simeq 85\text{ m}^3/\text{h} \end{aligned} \tag{II.1}$$

Limitations du modèle

Certains choix ont été faits en raison des limitations de modélisation :

- Le coefficient intérieur d'échanges convectifs est de $7,7\text{ W}/(\text{m}^2.K)$ pour toutes les parois et le coefficient extérieur est fixé à $25\text{ W}/(\text{m}^2.K)$ (NF EN ISO 6946 (2008)).
- Les ponts thermiques ont été définis comme une surface de déperdition équivalente à $13,2\text{ m}^2$ en considérant les coefficients de transmission thermique linéique (ψ en $W/(m.K)$) suivants :
 - $\psi_{mur/plancher} = 0,14$
 - $\psi_{mur/mur} = 0,13$
- La fenêtre de toit est placée horizontalement et non à 33 % (inclinaison réelle) car la bibliothèque *Buildings* ne supporte pas les surfaces vitrées obliques. Le facteur solaire utilisé est cependant celui défini pour 33 % dans sa fiche technique.

Comparaison avec un modèle multi-zone

Une comparaison a été réalisée entre un modèle multi-zone développé sous *Energy Plus* par le CEA dans le cadre du proje COMEPOS et le modèle mono-zone retenu dans ces travaux. Le fichier météo utilisé est celui de Bordeaux (IWEC - WMO 075100). La consigne de chauffage est de 19°C en occupation et de 16°C en inoccupation. L'étude ne portant pas sur l'évaluation du confort estival, seuls les besoins en chauffage ont été comparés. Les résultats pour l'approche mono-zone et de l'approche multi-zone sont similaires : respectivement 1150 kW h et 1190 kW h pour une année complète (Fig. II.4). Il peut être noté que le bâtiment modélisé avec *Modelica* se comporte de manière similaire au bâtiment modélisé avec *Energy Plus*. Il n'est cependant pas possible de comparer directement les puissances nécessaires car les deux logiciels ne considèrent pas les mêmes conditions initiales ni le même pas de temps. En effet le solveur utilisé dans *Dymola* utilise un pas de temps variable là où *Energy Plus* utilise un pas de temps fixe. Pour cette raison les appels de puissance sont en moyenne plus importants sur le modèle réalisé avec *Energy Plus* alors qu'il sont plus lissés lorsque le modèle est évalué avec *Dymola*. Le choix d'un bâtiment est donc pertinent dans l'optique de ces travaux et les différents scénarios retenus sont discutés dans la partie qui suit.

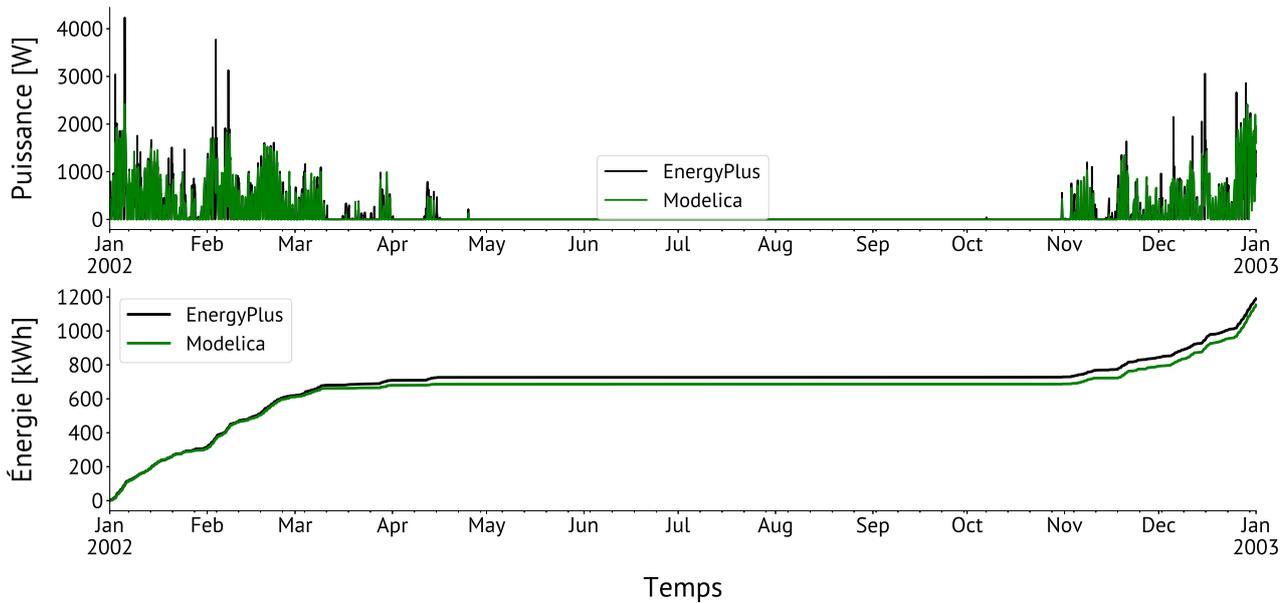


FIGURE II.4 – Évolution des besoins en chauffage (puissance appelée (haut) et énergie (bas)) entre le modèle mono-zone (*Modelica*) et le modèle multi-zone (*EnergyPlus*).

II.2.2 Scénarios de référence

Occupation

Un profil unique pour l'ensemble de la zone et pour chaque occupant est retenu (Fig. II.5). Il est considéré quatre personnes, deux enfants, et deux parents. Dans ce profil, les occupants sont considérés à la maison durant le week-end et absents durant les jours ouvrés (travail) exception faite du mercredi après-midi. La puissance par habitant est de 97,5 W (70 % convective), résultat de la moyenne pondérée de la puissance dégagée par une personne en fonction de la surface de chaque pièce dans le modèle multi-zone avec 78 W pour un enfant et 117 W pour un adulte (Tab. II.3).

TABLE II.3 – Récapitulatif des puissances dissipées en fonction des pièces.

Chambre 1	Chambre 2	Chambre 3	Séjour	Cuisine	Sanitaire	SdB	Cellier
78	78	117	97,5	97,5	114,3	114,3	114,3

Charges internes

En plus des occupants, les charges internes dues aux équipements sont prises en compte. Il est entendu comme charges internes, les consommations des équipements électriques (électroménager, ordinateurs...) et la consommation de l'éclairage. Aucune information n'étant disponible afin d'estimer les consommations réelles de la maison, les consommations réglementaires, RT2012 (CSTB 2011) ont été retenues. Dans les deux cas il est considéré une consommation type durant l'occupation et réduite en inoccupation.

Éclairage : La consommation est fixée à 1,4 W/m² (42 % convective) de 7 h à 9 h et de 19 h à 22 h (Fig. II.5). Durant le week-end, la consommation est réduite de 50 %, soit 0,7 W/m² de 10 h à 19 h. Finalement, en inoccupation la consommation est considérée comme nulle.

Équipements électriques : La consommation est fixée à $5,7 \text{ W/m}^2$ (80 % convective) durant l'occupation et à $1,14 \text{ W/m}^2$ en inoccupation, soit une

Consigne de chauffage

Le profil de température de référence (Fig. II.5) est issu de la réglementation thermique (RT 2012) qui prévoit le maintien d'une température de 19°C en occupation, et un réduit de 16°C en inoccupation. De plus, elle autorise un abaissement de la consigne durant la période nocturne : un réduit à 18°C est retenu.

Ventilation

Finalement le profil de ventilation de référence est considéré à $90 \text{ m}^3/\text{h}$ comme le prévoit l'arrêté du 24 Mars 1982 et du 28 Octobre 1983 pour une maison comportant quatre pièces principales. Il est aussi considéré une réduction du débit d'air neuf minimal à $20 \text{ m}^3/\text{h}$ en inoccupation.

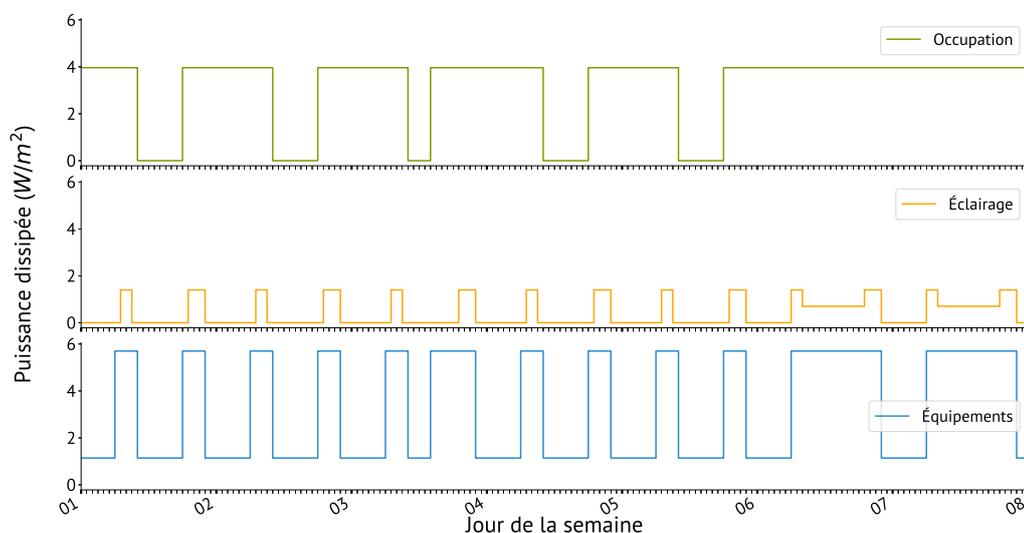


FIGURE II.5 – Profil de référence pour les charges internes (occupants, équipements et éclairage) et la consigne de chauffage.

II.2.3 Description du système solaire

Dans un premier temps un modèle existant et innovant basé sur le vecteur eau de l'entreprise *SolisArt* a été modélisé. Les travaux réalisés sur son développement sont en partie décrits dans BOIS et al. (2015). La maison considérée dans l'étude est du niveau RT 2005 et le système modélisé considère des radiateurs pour émetteurs. Les résultats obtenus montrent clairement le potentiel d'un SSC pour la maison individuelle, indépendamment du climat considéré. Ces travaux ont servi de base de travail pour le développement du système de ce document et s'inscrivent dans le cadre du projet COMEPOS (I.3.5) en partenariat avec l'entreprise IGC, un constructeur de maisons individuelles personnalisables implémenté dans 12 départements français.

Le système décrit dans ce chapitre est un SSC utilisant l'air comme vecteur de chaleur afin d'éviter l'installation d'un système de chauffage conventionnel (radiateurs, plancher chauffant...). Le système permet donc, par l'intermédiaire du réseau de ventilation, de couvrir les besoins chauffage (CH) pour l'ensemble du bâtiment. Le vecteur air est retenu afin d'améliorer la réactivité du bâtiment, et donc le ressenti de confort des occupants. Le système modélisé est composé de trois parties principales : la partie hydraulique, la partie aéraulique, et l'algorithme de contrôle qui orchestre le fonctionnement couplé entre le système solaire et le bâtiment (Fig. II.6). Le modèle correspondant réalisé sous *Dymola*

est disponible en annexe (Fig. D.1). De plus afin de permettre la reproductibilité des résultats les différents modèles retenus pour chaque composant du système sont listés et les modèles développés décrits en annexe (D).

Dans un premier temps le fonctionnement de la partie hydraulique sera détaillé. Dans un second temps la partie aéraulique sera présentée. Finalement la logique de contrôle sera décrite et le fonctionnement combiné du système et de la maison explicité.

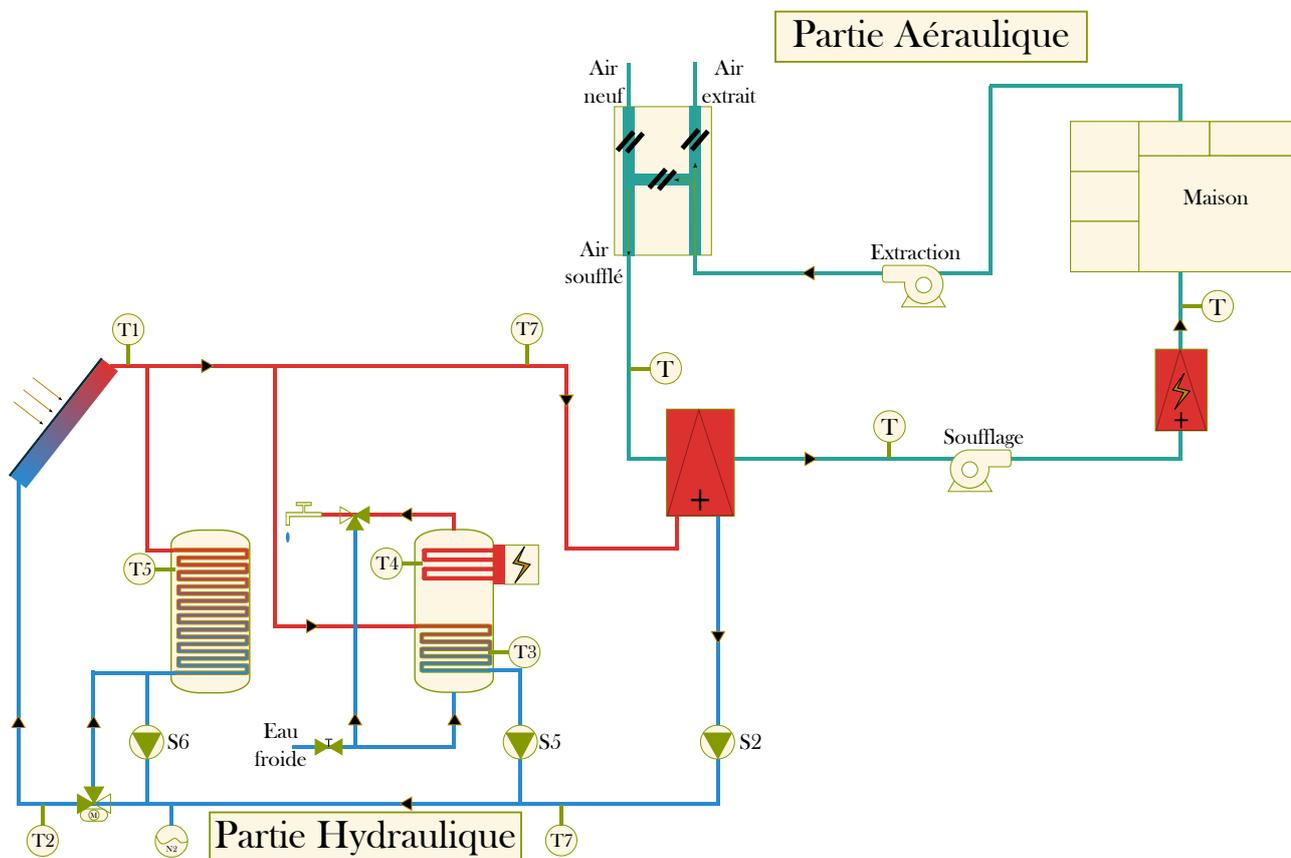


FIGURE II.6 – Description schématique du système solaire couplé à la ventilation.

Partie hydraulique

Le système hydraulique (Fig. II.6) est composé de deux ballons dont les caractéristiques sont disponibles dans le Tab. II.4. Le premier, le ballon sanitaire, permet de lisser la demande en énergie nécessaire pour couvrir les besoins en ECS. Le système est alors dit à semi accumulation car la réserve d'eau chaude est inférieure à la quantité totale puisée durant la journée. Le ballon sanitaire est connecté en continu avec le réseau d'eau froide public. Il est donc nécessaire, soit de maintenir à une température minimale de 55 °C l'eau du ballon, soit de réaliser une surchauffe journalière ([Arrêté du 30 novembre 2005](#)). La première option a été retenue afin de garantir le respect de la réglementation dans les limites techniques imposées par la modélisation. Le second, le ballon de stockage, est utilisé pour stocker l'énergie accumulée durant la journée afin de la valoriser en période nocturne. Il est retenu deux ballons afin de pouvoir travailler à des températures réduites sur le chauffage dans l'optique de valoriser au maximum l'énergie solaire récupérée. Dans les deux cas, le volume du ballon est discrétisé en 20 sous-volumes afin de tenir compte de la stratification. Cette stratification est particulièrement importante pour le ballon sanitaire où l'eau froide en partie basse, et l'eau à 55 °C en partie haute, imposent un différentiel de température important. Enfin, les deux ballons étant dans la partie chauffée de la maison, leurs déperditions sont considérées comme des charges internes au bâtiment.

Afin de garantir le maintien du confort thermique des occupants, un appoint électrique en partie haute du ballon sanitaire est aussi ajouté. Ce dernier n'est activé que lorsque l'énergie solaire disponible n'est pas suffisante. L'énergie solaire est elle transmise à l'eau par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques (Tab. II.5) puis vers le système aéraulique à l'aide d'un échangeur de chaleur. Finalement, le système comporte trois pompes : S6, S5, et S2. Un débit nominal de 40 l/(h.m²) (capteur) pour les pompes est considéré comme première approximation (PEUSER et al. 2005). Les pompes utilisées sont des pompes à vitesse variable afin de limiter les arrêts intempestifs (KICSINY et FARKAS 2012) et permettre de maintenir constant un différentiel de température comme décrit dans la suite du document.

TABLE II.4 – Caractéristiques techniques des ballons de référence (stockage et sanitaire).

Paramètre	Ballon de stockage	Ballon sanitaire	Unité
Volume	300	300	l
Hauteur	1,05	1,25	m
Épaisseur isolation	100	55	mm
λ isolant	0,04	0,04	W/m ² .K
Échangeur haut	0,85	0,64	m
Échangeur bas	0,15	0,13	m
Diamètre échangeur (extérieur)	34,6	33,7	mm
Chaleur spécifique de échangeur (acier noir)	490	490	J/kg.K
Puissance nominale	103	53	kW
Température nominale (ballon)	10	45	°C
Température nominale (échangeur)	45	10	°C
Débit nominal	0,36	0,366	kg/s

TABLE II.5 – Caractéristiques du capteur de référence (*Sonnenkraft IDMK 25-AL*) d'après Fig. D.5.

Paramètre	Valeur	Unité
Surface d'entrée	2,33	m ²
Poids à vide	49	kg
Contenance	1,35	l
Rendement optique (η_0)	76,5	%
Coefficient de pertes linéiques (a_1)	3,951	W/(m ² .K)
Coefficient de pertes surfaciques (a_2)	0,011	W/(m ² .K ²)
Modulation du direct (b_0)	-0,1396	-
Modulation du direct (b_1)	-0,0004	-
Modulation du diffus ($K_{\theta,dif}$)	92	%

Validation du modèle de capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermiques sont modélisés par l'équation « quasi-dynamique » implémentée dans le modèle *Fluid.SolarCollectors.EN12975* de la bibliothèque *Buildings*. Afin de tenir compte de la variation de la température dans les capteurs, ceux-ci sont discrétisés en 20 sous-volumes. Alors que la norme considère un unique modificateur d'IAM (b_0) le modèle *Fluid.SolarCollectors.EN12975* considère deux modificateurs (b_0 et b_1), permettant de mieux approcher le comportement réel du capteur (II.2).

$$K_{\theta,dir}(\theta) = 1 + b_0 \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) + b_1 \times \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right)^2 \quad (\text{II.2})$$

Ces modificateurs ont été définis par régression linéaire (Fig. II.7) à partir des données expérimentales disponibles dans le certificat du capteur (Fig. D.5 en annexe) pour des angles d'incidences allant de 0° à 70°.

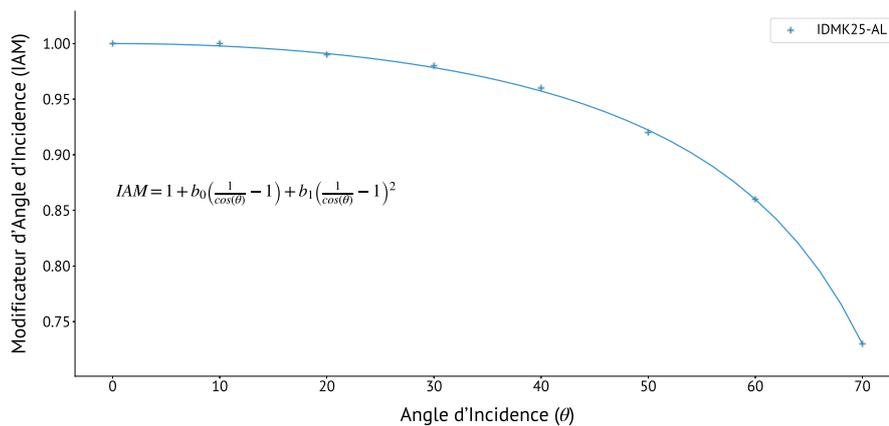


FIGURE II.7 – Évolution de $K_{\theta,dir}$ en fonction de l'angle d'incidence. Les croix représentent les points expérimentaux, et la courbe le résultat de la régression linéaire.

Afin de vérifier la pertinence du modèle des données expérimentales fournies par l'entreprise *SolisArt* ont été utilisés. Pour ce faire la température, le débit de l'eau en entrée des capteurs, et les irradiations directe et indirecte ont été utilisées comme conditions limites pour le modèle : la production des capteurs a ainsi pu être comparée. Les résultats montrent une production similaire sur les trois mois couverts par les données expérimentales (Fig. II.8, gauche). De plus, les parts respectives $I_{dif,inc}$ et $I_{dir,inc}$ calculées par le modèle *Fluid.SolarCollectors.EN12975* sont aussi comparées avec les résultats obtenus avec le logiciel *TrnSys*. Les deux modèles estiment de manière similaire l'irradiation sur une surface inclinée (Fig. II.8, droite). Au regard des résultats, le niveau de détail du capteur solaire semble suffisant et peut donc être utilisé dans le reste du document.

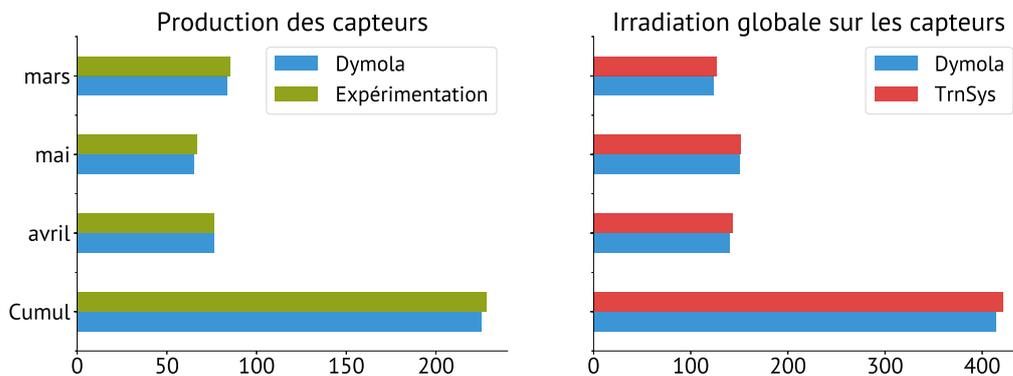


FIGURE II.8 – Irradiation sur les capteurs calculée avec *TrnSys* et *Modelica* (gauche). Production des capteurs pour des résultats expérimentaux et le modèle *Modelica* (droite).

Partie aéraluque

La partie aéraluque du système est responsable du renouvellement d'air et du chauffage par l'intermédiaire du solaire thermique ou bien de la batterie électrique en position terminale. Un caisson de mélange permet de récupérer une partie de l'énergie sur l'air extrait (Fig. II.6). L'air soufflé est un mélange entre l'air neuf et l'air repris dans le respect de la réglementation en vigueur (II.3.2). Le système de ventilation peut ainsi être apparenté à une ventilation mécanique par insufflation (VMI).

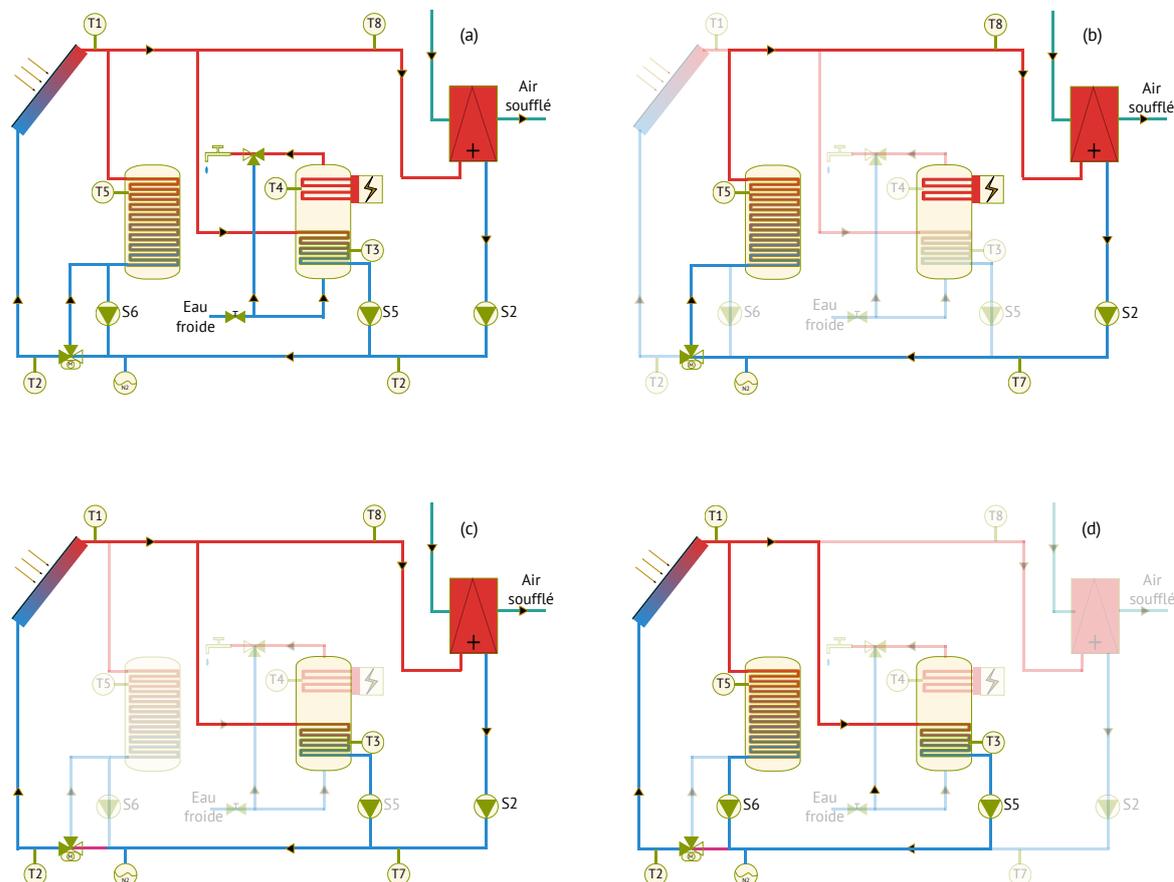


FIGURE II.9 – Description schématique des différents modes de fonctionnements du SSC. Système global (a), fonctionnement *Indirect* (b), fonctionnement *Direct* avec besoin de chauffage (c), et, fonctionnement *Direct* sans besoin de chauffage (d).

Modèle utilisés :

II.2.4 Logique de contrôle

Fonctionnement global

La partie hydraulique est contrôlée par un ensemble hiérarchisé de contrôleurs. Le niveau le plus élevé de contrôle a pour rôle l'activation ou la désactivation des différents éléments comme les pompes ou les vannes. Au plus bas niveau chaque pompe et chaque équipement électrique utilise un contrôleur Proportionnel, Intégral, Dérivé (PID). Cette approche permet d'adapter dynamiquement le comportement du système tout en conservant une stricte séparation entre la logique de chaque composant. Le système solaire fonctionne ainsi suivant trois principaux modes ordonnés afin de valoriser l'énergie solaire captée. (Fig. II.9). La représentation au niveau macro de l'ensemble de l'algorithme sous *Dymola* est disponible en annexe (Fig. D.2).

La priorité revient respectivement au maintien du ballon sanitaire, au respect de la température de consigne, puis à l'élévation de la température dans le ballon de stockage. Le respect de ces priorités n'est cependant pas exclusif. En effet, lorsque l'énergie solaire disponible est suffisante, le chauffage, l'ECS, et la charge du ballon tampon peuvent être actifs de manière simultanée. Durant la période diurne, l'énergie solaire est récupérée directement au niveau des capteurs solaires (mode *Direct*) et la vanne trois voies (V3V) est ouverte. L'activation des pompes S5, S2, et S6 permet alors respectivement de charger le ballon tampon, couvrir les besoins en ECS, et les besoins en chauffage. Le système ajuste alors la vitesse des pompes afin de maintenir une différence de température minimale (ΔT_{sol}) de 10 °C entre la sortie des capteurs (T1) et la température soit des ballons (T3, T5), soit de l'eau en sortie de

l'échangeur eau/air (T7). La différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur n'est pas utilisée comme un élément de régulation car cette approche ne permet pas de tenir compte de manière dynamique des fluctuations entre besoins, pertes, et énergie disponible (MOSALLAT et al. 2013). L'approche retenue tient compte des pertes en ligne mais aussi des fluctuations de la part d'énergie fournie aux ballons ou à l'air. Ainsi dans le cas où l'énergie solaire est importante, il est possible de la distribuer entre les différentes cibles. Dans le cas où l'énergie solaire est limitée la différence minimale de température assure de valoriser cette énergie en contrôlant dynamiquement le nombre de pompes activées.

En dehors des heures d'ensoleillement, le système utilise la chaleur stockée dans le ballon tampon pour couvrir les besoins de chauffage (mode *Indirect*). Ainsi le sens de circulation du fluide dans l'échangeur du ballon tampon est déterminé par la position de la V3V. Dans le mode *Direct*, la V3V est ouverte vers les capteurs permettant à la pompe S6 de s'activer : l'eau circule du haut vers le bas du ballon. Dans le mode *Indirect* la V3V bascule vers le ballon tampon (fermée coté capteurs) : l'eau circule du bas vers le haut (inverse) et la pompe S6 ne peut donc pas être active. Dans le cas où l'énergie accumulée dans le ballon sanitaire n'est pas suffisante (température inférieure à 55 °C), l'appoint électrique est activé afin de garantir la température minimale réglementaire. De même, pour le chauffage, une batterie électrique en partie terminale du réseau aéraulique s'active si la consigne de soufflage n'est pas respectée. Il est important de noter que les besoins en énergie peuvent être couverts simultanément par le solaire et par l'appoint électrique si l'énergie solaire disponible n'est pas suffisante.

Afin d'éviter les instabilités, deux formes d'hystérésis sont utilisés. Certains admettent des bornes min et max fixes (Fig. II.10a) comme pour le maintien de la température d'ECS au niveau du ballon sanitaire. La température doit être maintenue à 55 °C mais une variation de 5 °C est autorisée. Lorsque la température descend en dessous de 55 °C la demande en énergie est de nouveau active. Lorsque le ballon atteint une température supérieure à 60 °C la demande est de nouveau inactive. L'intervalle de température (55 - 60) représente alors une zone morte assurant une meilleure stabilité au système. Le même fonctionnement est admis pour les pompes afin d'éviter une activation trop rapide. Par exemple, si la température dans le ballon tampon (T5) est inférieure à 40 °C, alors le chauffage solaire *Indirect* ne peut pas être activé. Aussi, bien que le système puisse remplir plusieurs fonctions concurrentes, certaines contraintes permettent de garantir l'ordre des priorités. L'activation de la charge du ballon de stockage est ainsi seulement autorisée si la V3V est ouverte vers les capteurs solaires et si le ballon sanitaire en partie basse (position de l'échangeur solaire) a atteint au minimum 30 °C (T3). Cette règle permet de garantir que la couverture des besoins en ECS est prioritaire. Comme mis en avant dans la littérature, la sonde est positionnée à 1/6 de la position haute de l'échangeur solaire afin de valoriser l'énergie solaire sans risquer de refroidir l'eau du ballon. L'autre type d'hystérésis nécessite le retour d'une sonde de référence et les bornes min et max sont alors définies relativement à cette référence (Fig. II.10b). Par exemple, la consigne de chauffage étant variable l'hystérésis est définie relativement à la référence qui est la température de consigne. De même le maintien du différentiel de température (ΔT_{sol}) est fonction à la fois de la température de sortie des capteurs (T1) ou du ballon tampon (T5), et des températures en partie basse du ballon sanitaire (T3) ou de la sortie de l'échangeur T7. Ainsi il est aussi admis un hystérésis relatif à ce différentiel.

Architecture de l'algorithme : Chaque équipement ou entité est dans ces travaux représenté comme un automate fini (noté FSM, « Finite State Machine ») : la position de la V3V, l'état des pompes, et le mode de chauffage actif. Un FSM décrit un algorithme comme étant un ensemble d'états ayant un jeu de conditions et/ou temporisations permettant de passer d'un état à l'autre : les transitions. Dans le cas de la Fig. II.11, le FSM est initialisé dans l'état « Immobile debout » qui admet deux *transitions*, « Appui sur touche A » ou « Maintient la touche B ». Dès que la touche B est maintenue le FSM passe

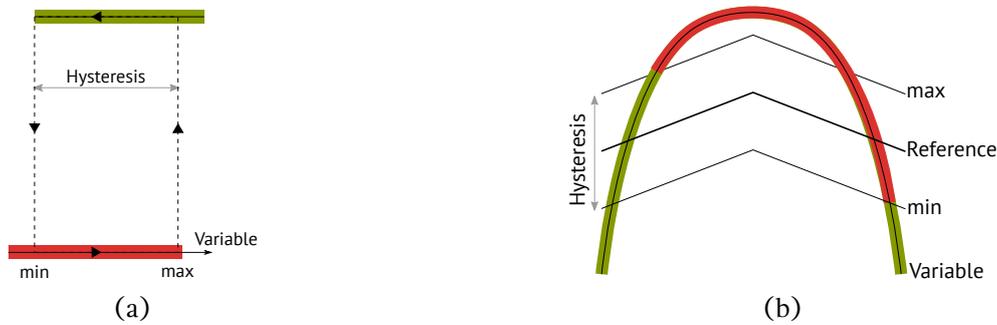


FIGURE II.10 – Principe de fonctionnement d'un contrôleur « Hystérésis » (a) et d'un contrôleur « OnOff » (b). Dans les deux cas, la sortie du contrôleur est « Vrai » si la couleur est verte, et « Fausse » si la couleur est rouge.

dans l'état « Se baisse ». Dans ce nouvel état, il n'existe qu'une unique *transition* : « Relâche la touche B ». Ainsi même si la touche A est pressée, rien ne se passera car l'action n'est pas prévue, il n'existe pas de *transition* pour cette action. Ainsi il est clair qu'un état est toujours unique, et que chaque état doit explicitement décrire les transitions permettant de passer de l'un à l'autre. L'approche est donc robuste, stable, et évite des comportements erratiques pour des configurations non prévues. Cependant, la définition explicite de chaque transition est à la fois une force et une faiblesse. Il est en effet maintenant nécessaire de décrire pour chaque état les transitions valables, processus rapidement répétitif. Afin de simplifier sa création, les Automates Finis Hiérarchisés (HFSM, Hierarchical Finite State Machine) ont été développés. Cette formulation admet que chaque état peut être lui-même un FSM dont les sous-états ne sont connus que de l'état maître. Cette nouvelle formulation permet ainsi de réduire le nombre de conditions de transition et l'encapsulation des sous-états simplifie la compréhension et la construction de l'algorithme. Il existe ainsi toujours un unique état maître actif mais celui-ci peut avoir un certain nombre de sous-états avec leur propres transitions.

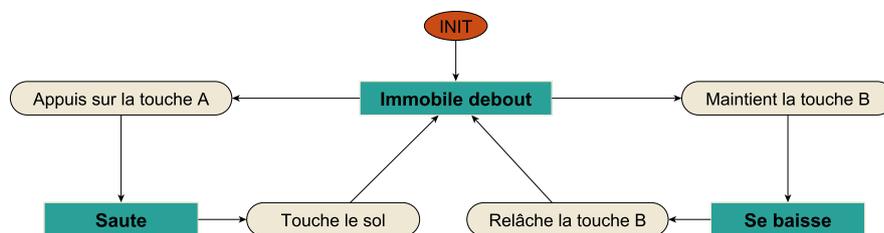


FIGURE II.11 – Illustration du fonctionnement d'un automate fini appliqué au contrôle d'un personnage fictif grâce à deux boutons : A et B.

Le HFSM gouvernant le chauffage admet trois états primaires : *Chauffage_{off}*, *Chauffage_{on}*, et *Surchauffe_{on}* (Fig. II.12). L'état *Chauffage_{on}* admet deux FSM fonctionnant en parallèle : celui du chauffage solaire, et celui du chauffage électrique. Le chauffage solaire admet ainsi trois sous-états : *Solaire_{off}*, *Solaire_{direct}*, ou *Solaire_{indirect}*. Le premier est actif lorsque il n'y a pas d'énergie solaire disponible ou pas assez pour couvrir les besoins en ECS et en chauffage. Le second (*Solaire_{direct}*) est actif lorsque il y a une demande en chauffage et que le système est en mode *Direct*. Finalement le dernier état est atteint lorsque il existe toujours une demande en chauffage et que le système est en mode *Indirect*. Il peut être noté l'ajout d'un hystérésis de 5°C mis en place sur la transition entre *Solaire_{off}* et les deux autres états. Dans les deux cas, une temporisation permet d'assurer que l'énergie est vraiment disponible et que ce n'est pas le résultat d'une variation parasite temporaire (activation d'une pompe, fermeture d'une vanne...). Le chauffage électrique lui admet deux états : *Appoint_{off}* et *Appoint_{on}* et est temporisée afin de favoriser le solaire thermique dans un premier temps. L'appoint électrique une fois activé reste cependant actif tant que le besoin de chauffage n'est pas couvert afin

d'assurer le confort des occupants. Lorsque le besoin de chauffage est couvert, le chauffage passe dans l'état *Surchauffe_{on}*. Comme décrit ci-avant, cet état autorise une élévation de la température dans le bâtiment. Finalement, dans le cas où la surchauffe n'est pas autorisée ou que de nouveaux besoins en chauffage apparaissent, l'état du chauffage est réinitialisé à *Chauffage_{off}* et la boucle de contrôle recommence. L'exemple suivant illustre le fonctionnement de l'algorithme :

« L'énergie disponible au niveau des capteurs est suffisante pour couvrir les besoins en chauffage de la maison. Le système solaire est en mode Direct, le chauffage dans l'état *Chauffage_{on}*, le chauffage solaire dans le sous-état *Solaire_{direct}*, et l'appoint électrique dans le sous-état *Appoint_{off}*. »

Un des habitants décide de prendre sa douche, abaissant la température de l'eau du ballon sanitaire en dessous du seuil minimal (55 °C). Dans cette configuration la pompe S5 va s'enclencher pour fournir de l'énergie au ballon sanitaire. Si l'énergie disponible au niveau des capteurs est insuffisante pour le chauffage et le maintien du ballon sanitaire alors la pompe S2 (chauffage) va s'arrêter car l'ECS est prioritaire. Le chauffage solaire passe alors dans l'état *Solaire_{off}* et l'appoint électrique est en attente d'activation pour permettre de couvrir le chauffage (temporisation de 3 min).

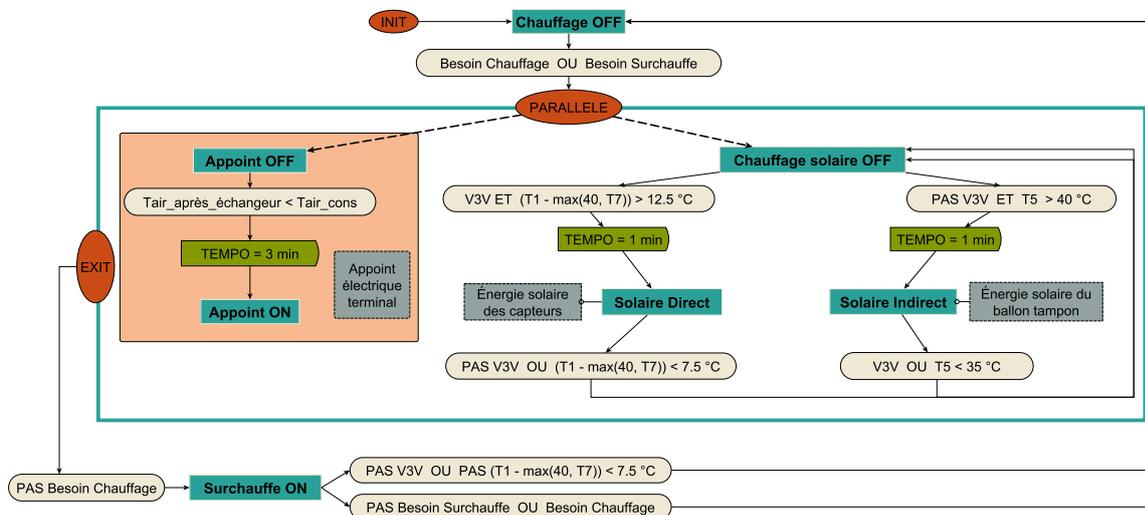


FIGURE II.12 – Description détaillée de l'HFSM contrôlant la transition entre les différents modes de chauffage.

L'algorithme de contrôle de la partie hydraulique fonctionne ainsi grâce à un algorithme maître en cascade qui délègue le contrôle des équipements à une combinaison de PID fonctionnant par rétroaction (feed-back). Cette approche permet au système de prévenir au niveau global les changements et de s'adapter aux besoins dynamiquement.

Logique de contrôle spécifique au chauffage solaire

Afin de favoriser le chauffage par l'énergie solaire, l'échangeur de chaleur entre l'eau et l'air est placé en amont du terminal électrique. Grâce à une loi d'air, loi proportionnelle par rapport à la température extérieure (similaire à une loi d'eau), la température de soufflage nécessaire est déterminée : T_{air}^{cons} (Tab. II.3). La température d'air en sortie de l'échangeur est directement liée à la température et au débit de l'eau en entrée de l'échangeur. Pour cette raison, la différence de température entre l'air en sortie de l'échangeur et la consigne (T_{air}^{cons}), est utilisée par le PID contrôlant la pompe S2.

$$T_{air}^{cons} = T_{air}^{ext} + PI_{souff} \times (T_{air}^{max} - T_{air}^{ext}) \quad (II.3)$$

avec PI_{souff} , T_{air}^{max} , et T_{air}^{ext} respectivement l'impact du contrôleur PI associé, la température maximale de l'air soufflé, et la température extérieure de l'air. Cette formulation permet d'éviter de souffler un air à une température élevée en continu. Cependant dans le cas où les besoins sont importants, le débit hygiénique ($Q_v^{min} = 90 \text{ m}^3/\text{h}$) est insuffisant et le débit doit être augmenté.

Une temporisation de 10 min est alors mise en place lorsque $T_{air}^{cons} = T_{air}^{max}$. À la fin de la temporisation si la température de la maison est toujours inférieure à T_{ins} , alors le débit soufflé est modulé jusqu'à un débit maximal de $Q_v^{max} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ permettant de couvrir l'appel de puissance maximal pour l'ensemble des climats. Ces temporisations permettent respectivement de favoriser en priorité le solaire et de garantir le maintien du confort thermique (Fig. II.13).

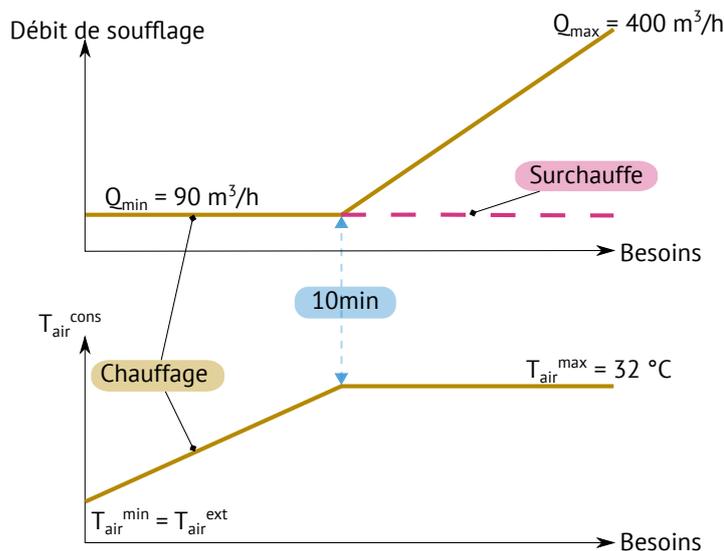


FIGURE II.13 – Fonctionnement de la régulation du chauffage par vecteur air.

Afin d'améliorer la couverture solaire sur le chauffage, l'algorithme autorise la surchauffe de la maison durant les périodes d'inoccupation diurnes (Fig. II.14) mais seul l'état *Solaire_direct* est autorisé. Dans ce cas, le débit minimum sanitaire est maintenu et seule T_{air}^{cons} varie afin que la température intérieure atteigne la température de consigne solaire : T_{sol}^{cons} . L'augmentation de la température intérieure permet de profiter de l'inertie du bâtiment, et ainsi retarder ou éviter la relance du chauffage : l'utilisation potentielle de l'appoint électrique sur le chauffage est réduite.

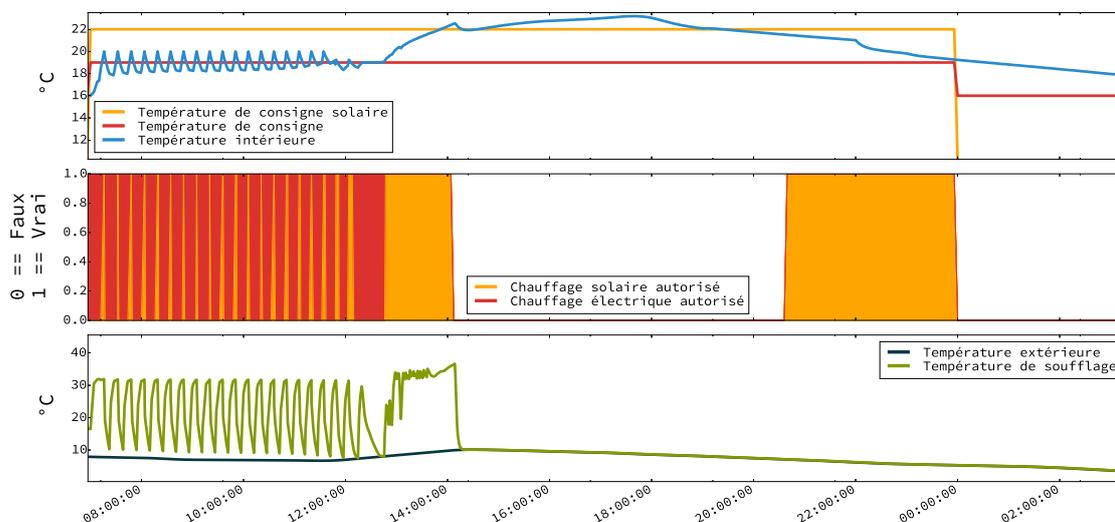


FIGURE II.14 – Principe de la surchauffe diurne durant une journée hivernale.

II.2.5 Bilan

Dans un premier temps le bâtiment et les scénarios internes ont été présentés. Le choix a été fait d'utiliser un modèle de bâtiment mono-zone et les résultats en comparaison avec un modèle multi-zone montrent que l'approche est pertinente. Ensuite le SSC et sa logique de fonctionnement a été présentée. Le système s'inspire des travaux de la littérature afin de proposer une approche simple et robuste en considérant le bâtiment et les systèmes comme un ensemble (Fig. II.15). La section suivante décrit ainsi logiquement son application à travers une étude paramétrique où des variations à la fois techniques et climatiques sont étudiées.

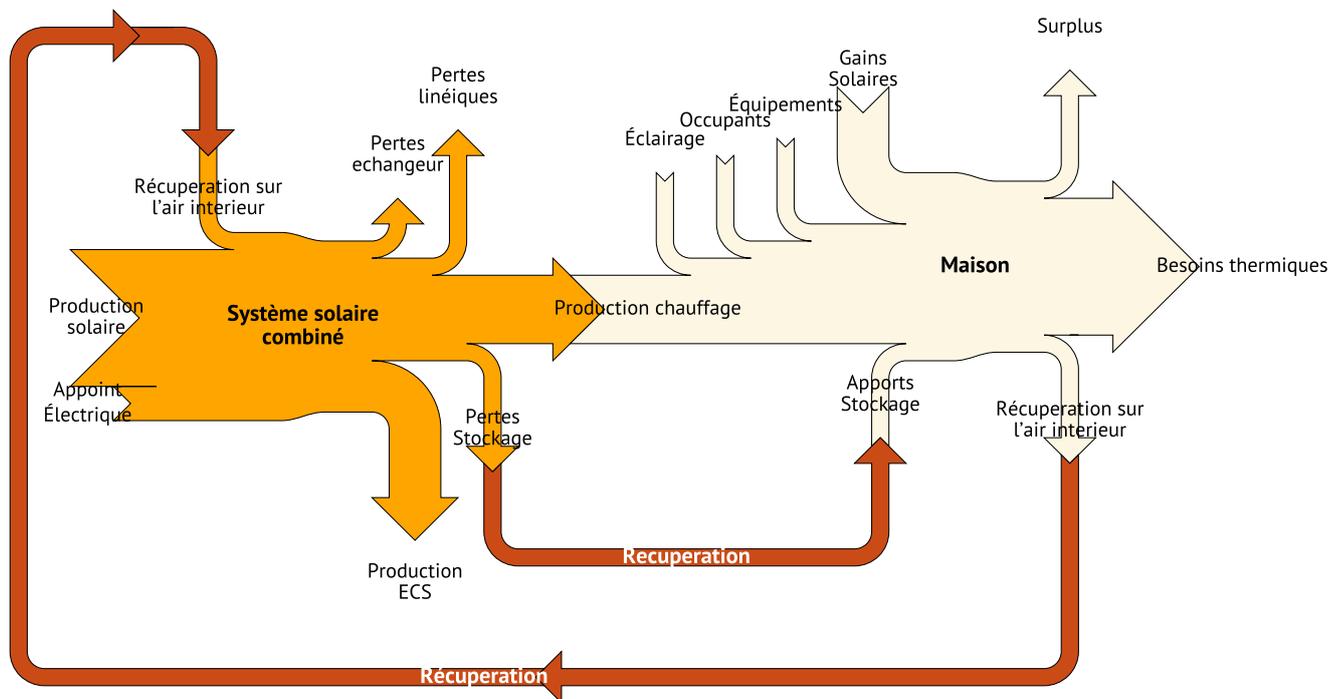


FIGURE II.15 – Récapitulatif du fonctionnement couplé du système solaire combiné et du bâtiment.

II.3 Étude paramétrique

L'étude paramétrique détaillée dans ce chapitre a été réalisée à partir de la version définitive de l'algorithme et du bâtiment. En effet, ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'un travail en collaboration avec l'entreprise IGC, un constructeur de maisons individuelles dans le sud-ouest de la France, à travers le projet COMEPOS. Les caractéristiques du bâtiment comme du SSC ont ainsi évolué au fur et à mesure de l'avancement du projet.

L'étude est nécessaire afin d'évaluer le potentiel du SSC. Dans un premier temps, les variations paramétriques retenues sont présentées : variations climatiques, scénarios, taille des équipements comme les ballons ou les capteurs solaires thermiques, logique de contrôle... Ensuite, la méthodologie utilisée pour l'analyse des résultats est introduite. Finalement, les observations sont ensuite détaillées et les limites de l'approche discutées.

II.3.1 Climats étudiés

Afin d'être couvrir les différentes zones climatiques de la France, l'étude a été réalisée pour cinq villes : Bordeaux, Nantes, Strasbourg, Limoges, et Marseille (Fig. II.16, Tab. II.6).

La ville de Marseille correspond à un climat très ensoleillé avec une faible demande en chauffage. À l'opposé le climat de Strasbourg est rude avec une forte demande en chauffage. Le climat de Bordeaux

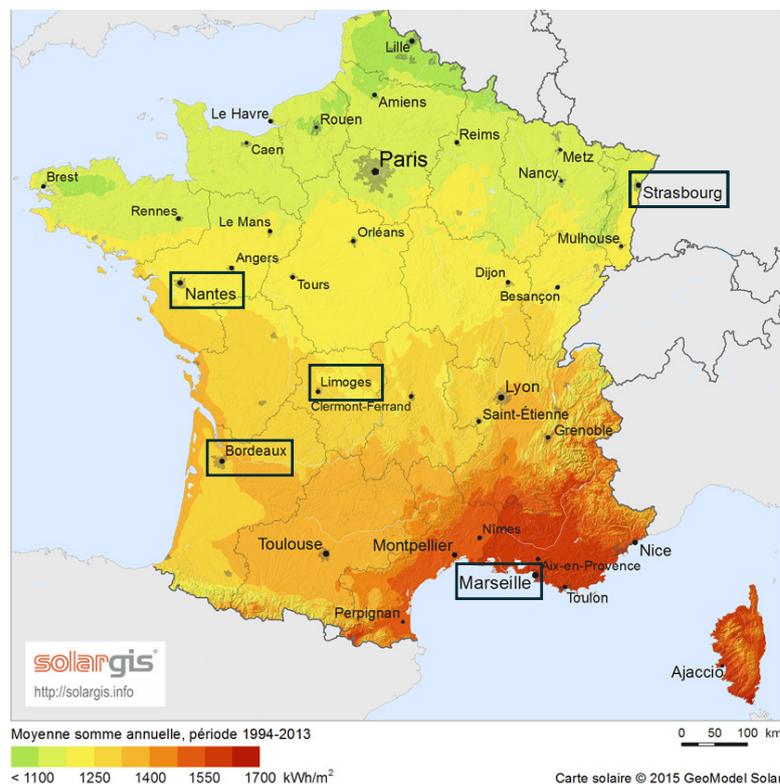


FIGURE II.16 – Cartographie des villes sélectionnées pour l'étude paramétrique.

est lui modéré : l'ensoleillement est correct et la demande en chauffage faible. Limoges et Nantes se placent entre Bordeaux et Strasbourg avec un bon ensoleillement mais une demande en énergie pour le chauffage plus importante que sur Bordeaux. Pour ces différents sites, la température du sol est considérée comme constante et est fixée à 10 °C. Bien qu'impactant les besoins d'un bâtiment, sa détermination de manière précise est un processus complexe spécialement lorsque de nombreuses variations de l'enveloppe comme des charges internes sont envisagées.

Dans un premier temps, l'impact du climat est investigué puis de nombreuses variations au niveau des équipements, des scénarios, et de la régulation sont évaluées pour deux villes : Bordeaux et Strasbourg.

TABLE II.6 – Description des différents climats retenus.

		Bordeaux	Nantes	Strasbourg	Limoges	Marseille
Irradiation solaire	IGH	1264	1184	1091	1257	1545
	IDN	929	885	721	1209	1503
	IDH	712	665	650	602	615
Température eau froide	Min	8,9	8,3	5,3	7	12
	Max	16	15	14	14	19
DJU (19 °C)	-	2408	2660	3360	2972	2049

II.3.2 Scénarios étudiés

Puisage en eau chaude sanitaire

Afin de pouvoir estimer la consommation nécessaire pour la production d'ECS, un profil de puisage type est nécessaire. Pour chaque climat, la température de l'eau du réseau suit une évolution

mensuelle extrapolée durant la simulation (Tab. II.7). Il existe donc une forte disparité entre les différents climats avec des extremums représentés respectivement par Strasbourg et Marseille :

- Les minimums varient entre 5,3 °C et 12 °C.
- Les maximums varient entre 14 °C et 19 °C.

TABLE II.7 – Température de l'eau du réseau (°C) au cours de l'année en fonction de la position géographique.

	Janv.	Fevr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Strasbourg	5,3	5,8	7,7	9,5	11	13	14	14	12	9,8	7,5	5,8
Limoges	7	7,4	9	10	12	14	14	14	13	11	8,8	7,3
Toulouse	8,6	9,2	11	12	14	16	17	17	16	13	11	9
Bordeaux	8,9	9,3	11	12	14	15	16	16	15	13	11	9,2
Nantes	8,3	8,5	9,9	11	13	14	15	15	14	12	9,8	8,6
Marseille	12	12	13	14	16	18	19	19	18	16	14	12

Profils retenus : Cinq scénarios ont été considérés dans ces travaux (Fig. II.17). Pour l'ensemble des profils, un volume de puisage typique moyen de 33 l/(jour.pers) (60 °C), soit un volume total de 220 l/jour (40 °C) pour les quatre occupants est retenu. Le profil de référence utilisé est le scénario décrit dans la norme NF EN 12977-1 (2013), **EN 12977**. Trois variantes ont aussi été évaluées favorisant respectivement un puisage en matinée (**Matin**), en soirée (**Soir**) et un puisage similaire pour les trois pics journaliers (**Réparti**). Finalement un scénario issu de données statistiques (ADEME 2016) a aussi été implémenté (**Réaliste**). Ce dernier décrit de manière plus représentative le comportement d'une famille dans une habitation individuelle ou un appartement, et les besoins journaliers sont pondérés en fonction du jour de la semaine (Tab. II.8).

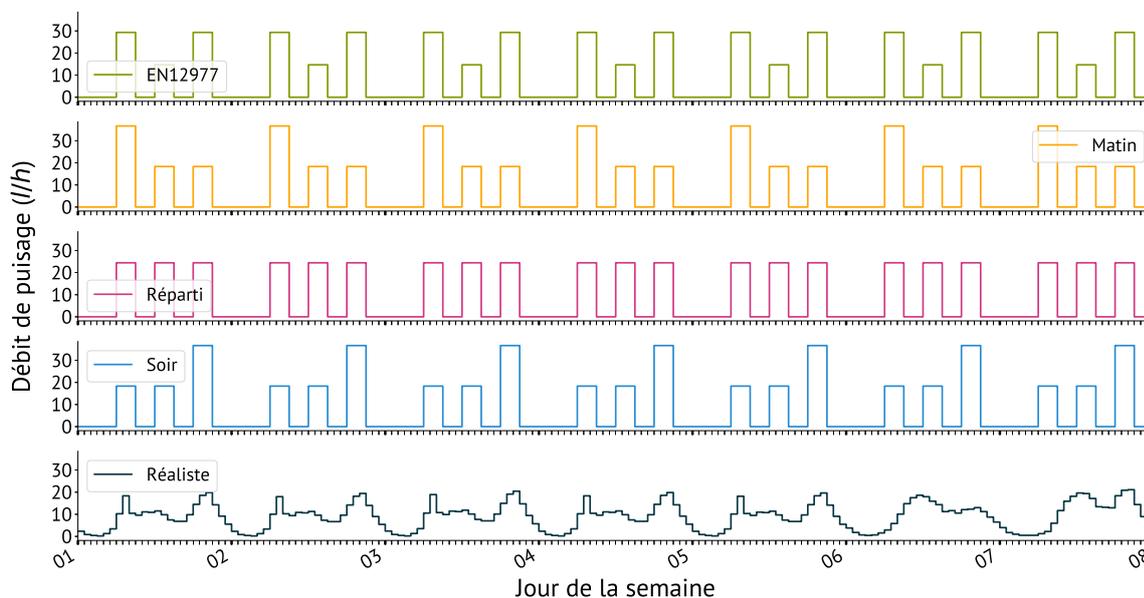


FIGURE II.17 – Description des profils de puisage envisagés.

Pondération de la demande : Afin d'évaluer l'impact de la variation mensuelle des besoins en ECS, l'ajout d'un coefficient mensuel est investigué. Les coefficients utilisés sont issus des travaux de l'ADEME (ADEME 2016). La demande totale reste inchangée; seule sa répartition est altérée. Les

résultats de l'ADEME montrent ainsi que le puisage est plus important durant la période hivernale (Tab. II.9).

TABLE II.8 – Détail des coefficients de pondération journaliers pour le profil de puisage **Réaliste**.

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Coefficient	0,97	0,95	1,00	0,97	0,96	1,02	1,13

TABLE II.9 – Détail des coefficients de pondération mensuels pour le profil de puisage **Réaliste**.

	Janv.	Fevr.	Mars	Avr.	Mai	Jun	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Coefficient	1,11	1,2	1,11	1,06	1,03	0,93	0,84	0,72	0,92	1,03	1,04	1,01

Variations paramétriques : L'évaluation de l'impact de la variation des profils de puisage comme de la quantité des besoins sur la performance du SSC est donc retenue. Les consommations variant fortement d'une habitation à une autre, des consommations de 27, 33, et 40 l/(jour.pers) (60 °C) sont aussi évaluées.

Ventilation

Deux scénarios de ventilation ont été retenus pour l'étude paramétrique :

- Référence : 90 – 20 m³/h (II.2.2)
- Constant : 90 – 90 m³/h

L'analyse de ces deux scénarios permettra d'identifier l'impact d'un débit réduit sur les consommations nécessaires afin de maintenir la température de consigne dans la maison.

Température de consigne

Consigne de chauffage : Afin de couvrir une large palette de scénarios, les consignes en inoccupation, en occupation diurne, et en inoccupation nocturne sont modifiées indépendamment. La consigne de référence étant, pour rappel, définie comme étant 19-18-16 : 19 °C durant les occupations diurnes, 18 °C durant les occupations nocturnes et 16 °C en inoccupation. À partir des règles et contraintes définies dans Tab. II.10 il est alors possible de construire un lot de scénarios représentatifs. L'étude cherchera en particulier à évaluer l'impact d'une augmentation de la consigne de chauffage, ainsi que du réduit en inoccupation et en période nocturne. Les scénarios construits sont les suivants : 19-18-16, 19-19-16, 19-19-19, 20-18-16, 20-20-16.

TABLE II.10 – Variations envisagées pour la consigne de chauffage en fonction de la période.

	16	18	19	20
Occupation (diurne)			■	■
Occupation (nocturne)		■	■	■
Inoccupation	■		■	

Consigne de chauffage solaire : L'impact de la température de consigne solaire (T_{sol}^{cons}) est aussi discuté. Deux configurations sont simulées. La première admet une température de consigne solaire de 22 °C et la seconde ne considère pas d'élévation de la température par le solaire. Pour rappel l'élévation de la température n'est possible que par l'énergie solaire provenant des capteurs et donc uniquement si le système est dans le sous-état *Solaire_{direct}*. Finalement les interactions entre consigne et consigne solaire de chauffage sont aussi discutées.

II.3.3 Variations techniques étudiées

Fluide caloporteur

Afin de pouvoir implémenter le modèle pour tous les climats, il est nécessaire de tenir compte des risques de gel. Le fluide caloporteur utilisé est donc un mélange composé à 70 % d'eau et 30 % d'éthylène-glycol.

Seuls les capteurs solaires sont à l'extérieur, il n'est alors pas nécessaire de protéger l'ensemble du système contre le gel. En effet, l'eau du ballon sanitaire provient du réseau d'eau de ville, et le ballon de stockage est dans une zone chauffée. Dans les deux cas une eau sans glycol est considérée. Ainsi seules les canalisations reliant les échangeurs contiennent du glycol et la modélisation admet deux fluides différents (Tab. II.11). Enfin, la variation de la capacité massique étant négligeable sur les plages de variation considérées (0 à 120 °C), le modèle assume une capacité massique constante permettant de simplifier les systèmes d'équations.

TABLE II.11 – Caractéristiques des deux fluides caloporteurs utilisés pour la modélisation.

	Eau	Eau + glycol	Unité
Chaleur massique	4180	3608	J/(kg.K)
Masse volumique	1000	1034	kg/m ³
Plage de variation	0 à 100	-20 à 110	°C

Capteurs solaires

Au cours de l'étude paramétrique, l'orientation, la surface, et l'inclinaison des capteurs est évaluée afin de comparer les résultats avec les observations déjà faites au cours des études antérieures (SHARIAH et al. 2002; STREICHER et HEIMRATH 2007). Les variations suivantes sont retenues :

- Inclinaison : 18,9° (33 %), 33°, 45°, 60°
- Orientation : Est, Ouest, Sud
- Nombre de capteurs : 2, 4, 6, 8

Finalement, la maison de référence est orientée Sud, comporte 4 capteurs de type IDMK 25, et une toiture ayant une pente de 33 %.

Ballons

L'analyse paramétrique tient aussi compte de variations au niveau des ballons comme son volume. Celui-ci est discrétisé en 20 segments numérotés de haut en bas permettant de prendre en compte le phénomène de stratification. Afin d'être cohérent, les caractéristiques des ballons sont proportionnelles à sa taille : si le volume du ballon augmente, sa hauteur augmente aussi. De même, la taille de l'échangeur est adaptée à la nouvelle hauteur du ballon afin que sa position relative reste identique. De cette manière, le ballon de stockage conserve un échangeur couvrant la quasi totalité du volume,

et l'échangeur solaire sur le ballon sanitaire reste adapté à la nouvelle taille du ballon. Les variations retenues pour chaque ballon sont identiques : 150 l, 300 l, et 450 l.

La position de l'échangeur solaire est aussi étudiée. Ces travaux ne considèrent que la position de l'échangeur du ballon sanitaire (Ech_{sol}^{pos}) car l'échangeur du ballon de stockage couvre presque l'intégralité de sa hauteur. De plus, afin d'être cohérent avec les variations réalisées sur le volume des ballons, la variation de Ech_{sol}^{pos} est réalisée relativement à sa position d'origine, laissant intact sa longueur. Il est alors possible d'évaluer l'impact du volume du ballon et de la Ech_{sol}^{pos} de manière combinée ou bien indépendamment. Les coefficients retenus sont issus des contraintes imposées par les spécificités techniques des ballons : 0,8, 1, et 1,3. Avec un coefficient de 0,8 l'échangeur sera ainsi positionné plus bas et avec un coefficient de 1,3, il sera à l'inverse plus haut. La position haute de référence pour l'échangeur(1) correspond au 12^{ème} segment.

Algorithme

Finalement il est aussi étudié à travers cette étude des variations au niveau de l'algorithme de contrôle (Tab. II.12). ΔT_{sol} , la différence de température entre la source (sortie des capteurs) et la cible (sortie des échangeurs) est modulée autour du cas de référence (10 °C). Augmenter le ΔT_{sol} revient à attendre plus longtemps avant d'autoriser l'utilisation de l'énergie solaire et impose une température en sortie des capteurs plus élevée afin de valoriser les apports solaires. À l'inverse diminuer ce paramètre amène le système à être plus réactif mais le risque d'instabilité est plus important. Il est aussi évalué l'impact des temporisations au niveau de la régulation du chauffage par vecteur air :

- Activation de la batterie électrique terminale
- Modulation du débit de soufflage
- Modulation de la température de soufflage

La première temporisation (trois minutes pour le cas de référence), est notée $Tempo_{batterie}$. Elle permet d'éviter d'activer la batterie terminale électrique directement à chaque demande de chauffage. Elle permet donc de retarder son activation quand de l'énergie solaire est disponible. La seconde temporisation correspond à la temporisation entre la modulation de la température, et la modulation du débit pour le chauffage par l'air. Le cas de référence admet une temporisation de 10 min notée $Tempo_{souff}$.

TABLE II.12 – Variations algorithmiques étudiées lors de l'étude paramétrique.

Paramètre	Référence	Variations	Unité
ΔT_{sol}	10	5, 15	°C
$Tempo_{batterie}$	3	2, 4	min
$Tempo_{souff}$	10	5, 15	min

II.3.4 Analyse des résultats

Méthodologie

L'analyse a été réalisée sur la base d'un cas de référence dont les scénarios et les caractéristiques ont été présentés dans les parties précédentes. Sans mentions explicites, les simulations utilisent ces paramètres. L'ensemble des variations possibles ainsi que le cas de référence sont décrits par un tableau récapitulatif (Tab. II.13) afin d'offrir une vue globale des variations étudiées. Enfin afin d'évaluer le système solaire, différents indicateurs sont introduits (II.4). La consommation électrique tient

compte de la consommation des deux appoints (chauffage et ECS) mais aussi de la consommation des pompes du SSC. Elle est notée $Conso_{app}$ dans le reste de l'étude. Enfin F_{sol}^{ECS} et F_{sol}^{CH} sont respectivement le taux de couverture sur la production de l'eau chaude sanitaire et sur le chauffage. Le taux de couverture correspond au rapport entre la production solaire et la consommation de l'appoint et s'exprime sous la forme d'un pourcentage.

TABLE II.13 – Description de la solution de référence et de variations étudiées.

Scénarios	Référence	Variations	Unité	Détails
Ventilation	90 – 20	90 – 90	m ³ /h	II.3.2
Chauffage	19-18-16	19-19-16, 19-19-19, 20-18-16, 20-20-16	°C	II.3.2
Chauffage solaire	Avec (22)	Sans	°C	
$Puisage_{scenario}$	EN 12977	Soir, Matin, Réparti, Réaliste	l/h	
$Puisage_{vol}$ (60 °C)	33	27, 40	l/(jour.pers)	II.3.2
$Puisage_{mod}$	Non	Mensuelle	-	
Équipements				
Nombre de capteurs	4	2, 6, 8	-	
Inclinaison des capteurs	33	18,9, 45, 60	°	
Orientation des capteurs	Sud	Est, Ouest	-	
Volume ballon de stockage	300	150, 450	l	
Volume ballon ECS	300	150, 450	l	II.3.3
Ech_{sol}^{pos}	1	0,8, 1,3	m	
Algorithme				
$Tempo_{batterie}$	3	2, 4	min	
$Tempo_{souff}$	10	5, 15	min	II.3.3
ΔT_{sol}	10	5, 15	°C	

$$Conso_{app} = Conso_{app}^{ECS} + Conso_{app}^{CH} + Conso_{pompes}$$

$$F_{sol} = \frac{Prod_{sol}}{Conso_{app} + Prod_{sol}}$$

$$F_{sol}^{ECS} = \frac{Prod_{sol}^{ECS}}{Conso_{app}^{ECS} + Prod_{sol}^{ECS}} \quad (II.4)$$

$$F_{sol}^{CH} = \frac{Prod_{sol}^{CH}}{Conso_{app}^{CH} + Prod_{sol}^{CH}}$$

Impact des conditions météorologiques

Les résultats obtenus à enveloppe identique pour les différents climats sont disponibles dans le Tab. II.14. Une forte disparité dans les consommations de chauffage est observée. La consommation totale pour Marseille est la plus faible, et deux fois plus d'énergie est nécessaire pour couvrir les besoins de Strasbourg. De plus il est aussi mis en évidence l'impact important de la température de l'eau froide du réseau. En effet les simulations admettent le même scénario de puisage mais la $Conso_{app}^{ECS}$ varie de 400 kW h entre Marseille et Strasbourg. Les pertes en ligne à travers les canalisations ($Pertes_{réseau}$) sont similaires pour les différents climats et la consommation des pompes ne semble pas être un facteur impactant sauf pour Marseille où la $Conso_{app}$ (ECS + CH) est très faible.

La $Conso_{app}^{ECS}$ pour les conditions de Limoges et de Nantes sont similaires malgré une consommation totale pour la production d'ECS plus importante sur Limoges. L'ensoleillement plus élevé sur la ville de Limoges (Tab. II.6) permet en effet de valoriser une part d'énergie solaire plus grande. Pour les mêmes raisons, le SSC permet d'économiser 50 kWh supplémentaires sur le chauffage ($Conso_{app}^{ECS}$) lorsqu'il est installé sur Limoges au lieu de Nantes. Pour Strasbourg, il semble que quatre capteurs solaires soient insuffisants pour permettre de couvrir majoritairement les besoins par le solaire. Finalement, le système solaire obtient une bonne performance autant sur le F_{sol}^{ECS} que sur le F_{sol}^{CH} en récupérant une quantité d'énergie solaire relativement proche sur les différents climats.

TABLE II.14 – Performances annuelles du système solaire pour différents climats.

	Consommation [kW h]									%	
	Totale			Appoint		Solaire					
	ECS	CH	Pompes	ECS	CH	$Solaire_{abs}$	$Pertes_{réseau}$	ECS	CH	F_{sol}^{ECS}	F_{sol}^{CH}
Bordeaux	2962	986	4	194	138	3479	261	2768	848	93	86
Strasbourg	3175	2021	5	599	1294	3237	239	2575	726	81	36
Marseille	2748	907	4	12	3	3450	266	2736	904	100	100
Nantes	3031	1114	4	346	316	3375	251	2685	798	89	72
Limoges	3106	1301	5	342	452	3511	250	2764	850	89	65

L'évolution des températures des différents ballons durant la période de chauffage pour les différents climats donne plus d'informations (Fig. II.18). Du fait des priorités de régulation le ballon de stockage ne peut être chargé si la partie basse du ballon sanitaire (T3) n'est pas à une température suffisante. Ainsi l'évolution des températures des ballons permet de renseigner sur l'activité du système, et plus particulièrement sur l'importance de l'énergie solaire récupérée par rapport à la demande. Sur Limoges, le système utilise principalement l'énergie solaire durant tous les mois à l'exception de décembre où T5 stagne. Durant janvier, l'énergie solaire est suffisante pour charger le ballon de stockage et réduire la $Conso_{app}$ sur l'ECS. Cependant, T4 stagne autour de 55 °C car l'énergie solaire fournie ne permet pas de charger le ballon sanitaire suffisamment. Pour le climat de Strasbourg, le système ne collecte pas assez d'énergie de novembre à février afin d'être autonome mais l'énergie accumulée permet cependant de préchauffer l'eau du réseau et donc réduire la $Conso_{app}$. Finalement installé sur Bordeaux le système permet de couvrir la majorité des besoins même si durant décembre et janvier l'appoint électrique est nécessaire ponctuellement.

Période de simulation : L'optique de cette étude paramétrique étant d'évaluer l'impact de différents éléments du SSC (technique et algorithmique) il n'est pas nécessaire de simuler les périodes où le système est autonome. Chaque simulation annuelle nécessite en effet entre 1 h et 3 h (avec un ordinateur équipée d'un processeur *i7* – 4800MQ 2,7 GHz) et réduire la période de simulation permet de réduire la durée d'intégration. Des simulations comprenant un jeu de paramètres défavorables ont aussi été réalisées afin d'évaluer la période de simulation minimale nécessaire. Pour ces simulations, un scé-

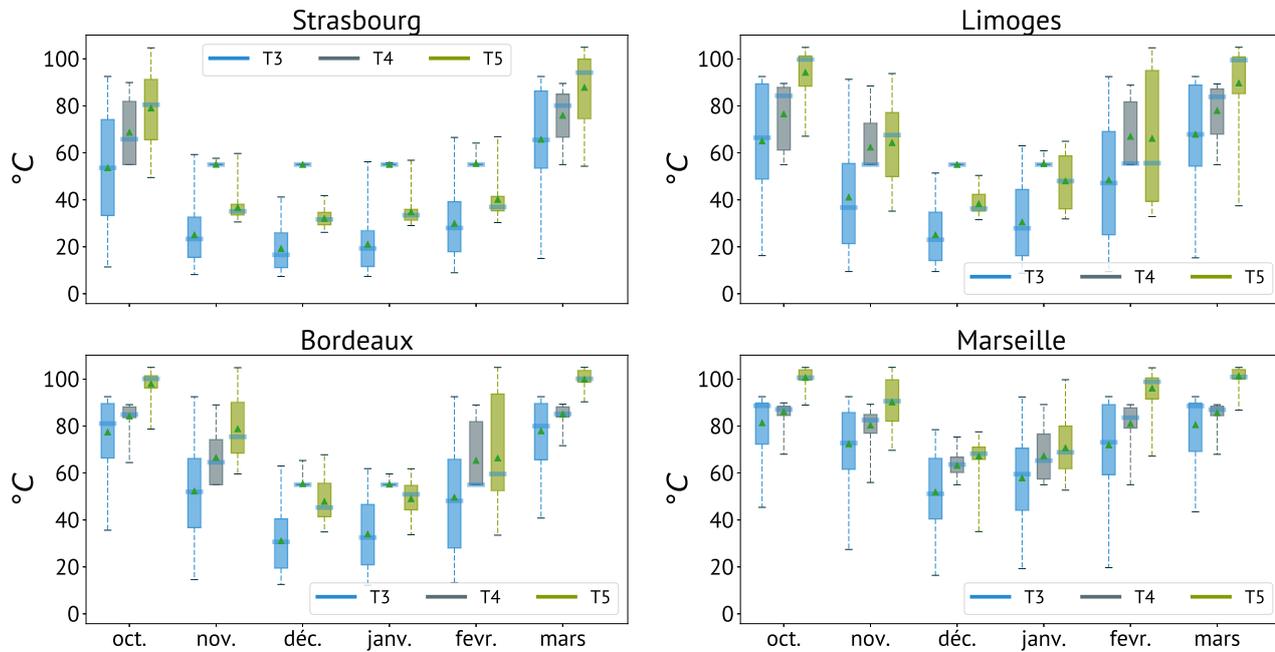


FIGURE II.18 – Évolution des température internes des ballons du SSC en fonction du mois de l'année avec indication de la moyenne (triangle vert) et de la médiane (rectangle horizontal bleu).

nario de chauffage 19-19-19, un volume de 450 l pour les deux ballons, ainsi que deux capteurs avec une orientation Ouest et une inclinaison de $18,9^\circ$ sont retenus. Les résultats montrent que durant la période estivale, le système solaire est autonome avec une $Conso_{app}$ de seulement $0,01 \text{ kW h/m}^2$ et $0,08 \text{ kW h/m}^2$ pour respectivement Bordeaux et Strasbourg. Dans le reste de l'étude paramétrique les résultats sont donc discutés sur une période s'étendant du 1^{er} octobre au 30 avril permettant de réduire à $\approx 1 \text{ h}$ le temps de simulation. Les résultats sont fournis pour la période concernée et doivent donc être vus comme la **performance minimale** du SSC. En effet, le système est autonome durant le reste de l'année car les besoins en chauffage et en ECS sont complètement couverts par la production solaire : le F_{sol}^{ECS} et le F_{sol}^{CH} annuels sont donc supérieurs car ils tiennent compte de la période d'autonomie complète du SSC. Afin de ne pas pénaliser le système, l'eau du système est à une température initiale de 55° . De plus durant les 12 premiers jours (en septembre), l'énergie consommée par le système n'est pas considérée afin de laisser le système se positionner dans une configuration correspondant à la saison.

Impact des scénarios internes

Dans cette section l'impact des charges internes et de la consigne de température est investigué. Afin d'éviter la redondance, les différentes variations sont seulement réalisées pour le climat de Bordeaux et de Strasbourg. L'analyse des résultats montre que le comportement du système est similaire pour les deux climats : l'analyse est donc illustrée uniquement pour le climat de Strasbourg où les modifications ont un impact plus net.

Afin de pouvoir comparer de manière efficace les variations paramétriques une représentation graphique est introduite (Fig. II.19). Elle permet de visualiser les paramètres caractéristiques du système combiné :

- Le F_{sol}^{ECS} : la longueur des barres horizontales
- Le F_{sol}^{CH} : la largeur des barres dont l'étendue de variation quantitative est décrite en bas à droite.

Il est aussi possible d'évaluer la production solaire valorisée ($Prod_{sol}^{valorisée}$), définie comme la part solaire transmise à l'eau après soustraction des pertes au niveau des canalisations; et la part d'énergie

consommée par l'appoint ($Conso_{app}$). Ces deux indications sont fournies à l'extrémité de chaque barre horizontale et une légende est disponible en dessous. Enfin la couleur et l'ordre des barres sont définis à partir des valeurs normalisées du rendement solaire des capteurs (η_{sol}) dont l'échelle est disponible en partie droite. Le η_{sol} traduit le rapport entre la $Prod_{sol}^{valorisée}$ et l'énergie incidente sur les capteurs : il indique donc la part utile de l'énergie récupérée par rapport à l'énergie solaire incidente.

L'analyse de la Fig. II.19 permet d'obtenir de nombreuses informations. Augmenter la température de consigne durant la période d'occupation (20-20-16) augmente de 8 % la $Conso_{app}$ sur le chauffage, mais n'impacte pas le F_{sol}^{ECS} . Il est aussi important de noter que le réduct de nuit permet de réduire sensiblement la $Conso_{app}$ mais le F_{sol}^{ECS} et le F_{sol}^{CH} restent inchangés. Le SSC fonctionne ainsi aussi bien avec que sans réduct de nuit et la $Conso_{app}$ est seulement proportionnelle à l'augmentation de la demande en énergie pour le chauffage. Cependant la performance du SSC est impactée si on considère une consigne de chauffage constante (19-19-19).

L'impact de la ventilation est plus subtil. Le scénario de ventilation 90-90 augmente le F_{sol}^{CH} ($\approx 3\%$) mais réduit le F_{sol}^{ECS} ($\approx -1\%$) en comparaison avec le scénario de référence qui considère un réduct en inoccupation (90-20). Un débit minimal réduit en inoccupation (90-20) augmente alors la $Conso_{app}$ pour le chauffage (≈ 15 kWh). Cependant la $Conso_{app}$ diminue (≈ -8 kWh) car la part électrique couvrant la production d'ECS diminue. En effet, lorsque le débit de ventilation est plus élevé le SSC est capable de fournir plus d'énergie pour le chauffage au détriment de l'ECS expliquant cet équilibre. Il est aussi intéressant de noter que le rendement des capteurs augmente si on considère un débit de ventilation constant (90-90). Au regard des différentes remarques il semble donc que favoriser en priorité la production d'ECS permet de mieux valoriser l'énergie solaire.

Enfin il apparaît sans surprise que la diminution des apports internes, réduction par deux des charges internes électriques (équipements et éclairage), impacte fortement l'ensemble des indicateurs. En effet les charges internes représentent la majorité des consommations pour des bâtiments dont l'enveloppe est très performante (Fig. II.20). Il est donc important de tenir compte des scénarios d'éclairage, de l'utilisation des équipements et des occupants pour analyser la performance d'un SSC pour des BEPOS.

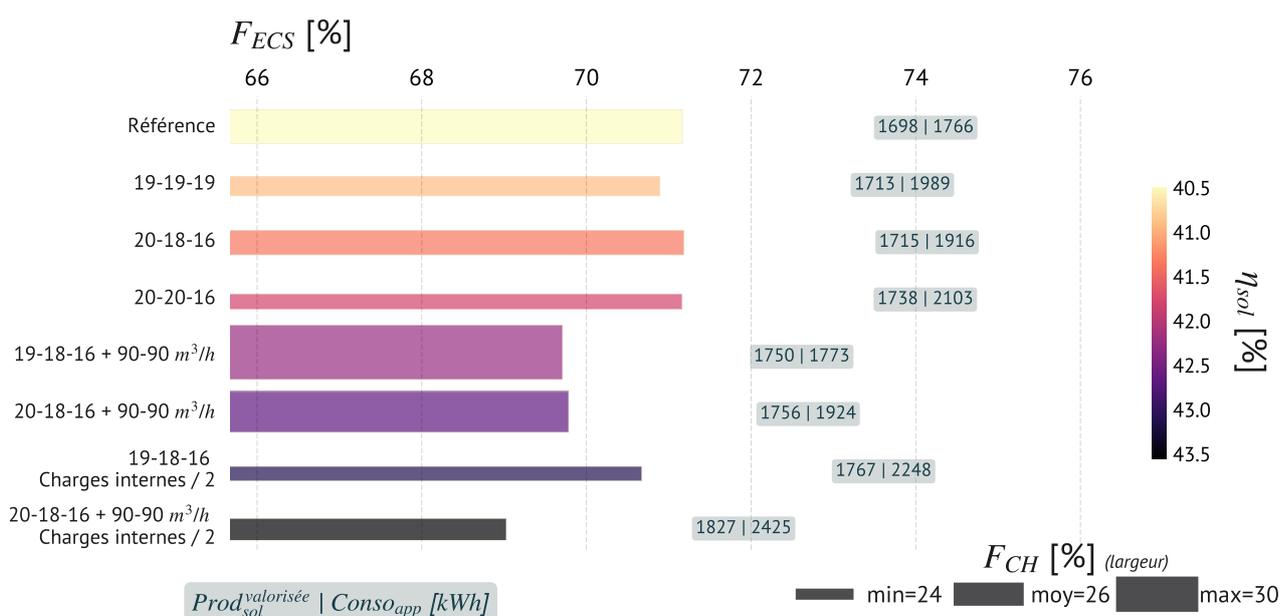


FIGURE II.19 – Impact de la température de consigne sur la performance du SSC à Strasbourg durant la période de chauffage (01/10 - 30/04).

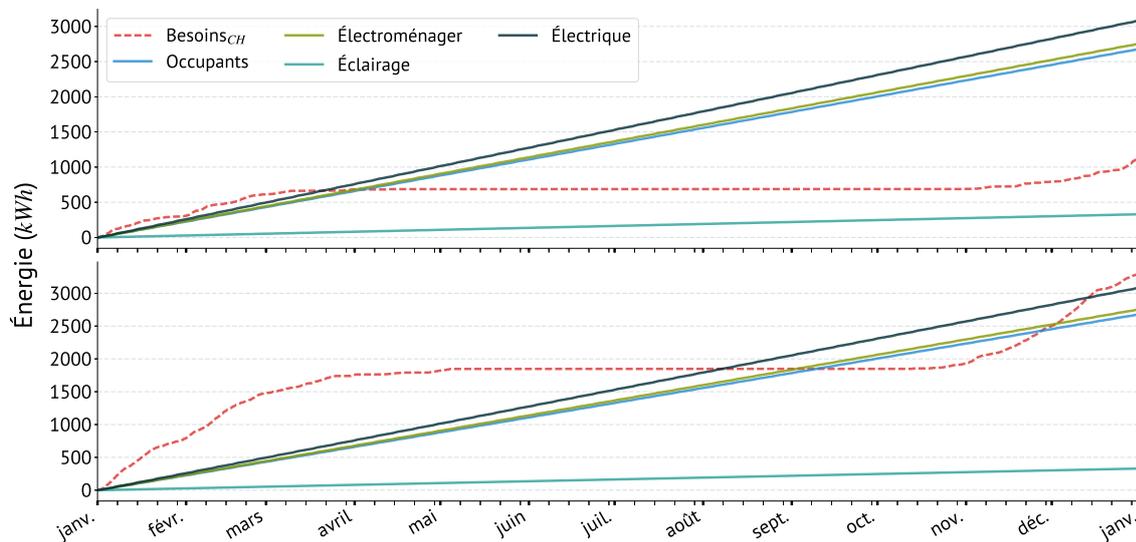


FIGURE II.20 – Évolution annuelle des charges internes et des besoins du bâtiment pour la simulation de référence : (haut) Bordeaux, (bas) Strasbourg.

Impact des ballons

Outre la surface de capteur, le choix du volume des ballons, stockage comme sanitaire, reste un élément déterminant lors du dimensionnement d'un SSC. Cette section discute l'impact du volume mais aussi de la position de l'échangeur solaire. Pour rappel, la position de l'échangeur est définie de manière relative afin d'être indépendante des variations réalisées sur le volume du ballon.

Le climat de Strasbourg est retenu afin d'illustrer les résultats et ceux sur Bordeaux sont ensuite discutés. Au regard des résultats, augmenter le volume du ballon sanitaire (300 à 450 l) améliore les indicateurs principaux (le F_{sol}^{ECS} , le F_{sol}^{CH} , et la $Conso_{app}$). Cependant la part électrique pour le chauffage augmente. Au niveau du ballon de stockage, un volume plus important améliore le F_{sol}^{CH} et réduit la $Conso_{app}$ ainsi que le F_{sol}^{ECS} . Dans les deux cas, l'énergie solaire incidente est mieux valorisée (η_{sol} augmente). De plus les températures des ballons (T3, T4, T5) fluctuent plus doucement lorsque le volume est important. Réduire le volume des deux ballons (300 à 150 l) impacte négativement les performances du SSC mais l'inverse améliore l'ensemble des indicateurs. Aussi, le volume du ballon sanitaire importe plus que celui du ballon de stockage et un volume de 450 l semble préférable. Pour le ballon de stockage, un volume compris entre 300 et 450 l est suffisant. La même analyse sur le climat de Bordeaux traduit un comportement similaire. Cependant, la $Conso_{app}$ varie de manière plus importante.

Il est aussi mis en évidence un élément important lors de l'évaluation d'un SSC. La couverture solaire (F_{sol}), ne permet pas de clairement évaluer la performance d'un système solaire. En effet au regard des résultats, faire varier le volume du ballon de stockage ou sanitaire n'a pas d'effet (Fig. II.21). Il est nécessaire, comme cette analyse le fait, de considérer séparément le F_{sol}^{ECS} et F_{sol}^{CH} afin de comprendre que le système favorise dans un cas le chauffage et dans l'autre la production en ECS. Le système est donc capable de s'adapter à différentes conditions de fonctionnement.

L'analyse de l'impact de la position de l'échangeur est illustrée à travers la Fig. II.22. Il est observé que la position de l'échangeur impacte fortement les performances du SSC (F_{sol}^{CH} et F_{sol}^{ECS}), en particulier lorsque le volume du ballon est faible. Pour les deux climats, une position basse (0,8) est à favoriser afin d'améliorer le rendement des capteurs et réduire la part couverte par l'appoint. Il est cependant noté qu'une position plus élevée (1,3) permet de réduire sensiblement la $Conso_{app}$ sur le chauffage. Enfin contrairement au volume du ballon dont l'impact est plus significatif sur Bordeaux, le climat de Strasbourg est plus sensible à la position de l'échangeur solaire du ballon sanitaire (Ech_{sol}^{pos}).

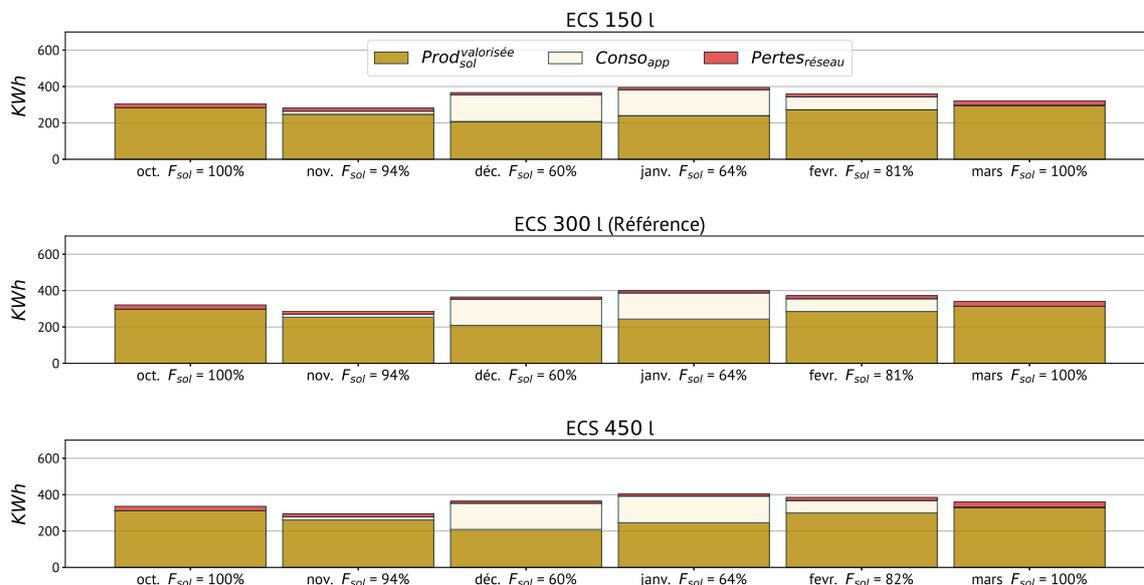


FIGURE II.21 – Évolution mensuelle de la répartition des consommations et du taux de couverture solaire (F_{sol}) à Bordeaux (01/10 - 30/04).

En effet, la position de l'échangeur est un facteur influençant directement la production solaire valorisée ($Prod_{sol}^{valorisée}$). Il est donc clair que le gain potentiel est plus notable lorsque l'ensoleillement est moins important comme à Strasbourg. Finalement l'impact du matériau utilisé pour l'échangeur a aussi été évalué et sa composition n'impacte pas les performances du SSC. En résumé, la position de l'échangeur et le volume des ballons sont des facteurs impactant la performance du SSC. Il semble aussi plus important de favoriser le volume du ballon sanitaire et de positionner en partie basse l'échangeur afin d'améliorer la $Prod_{sol}^{valorisée}$.

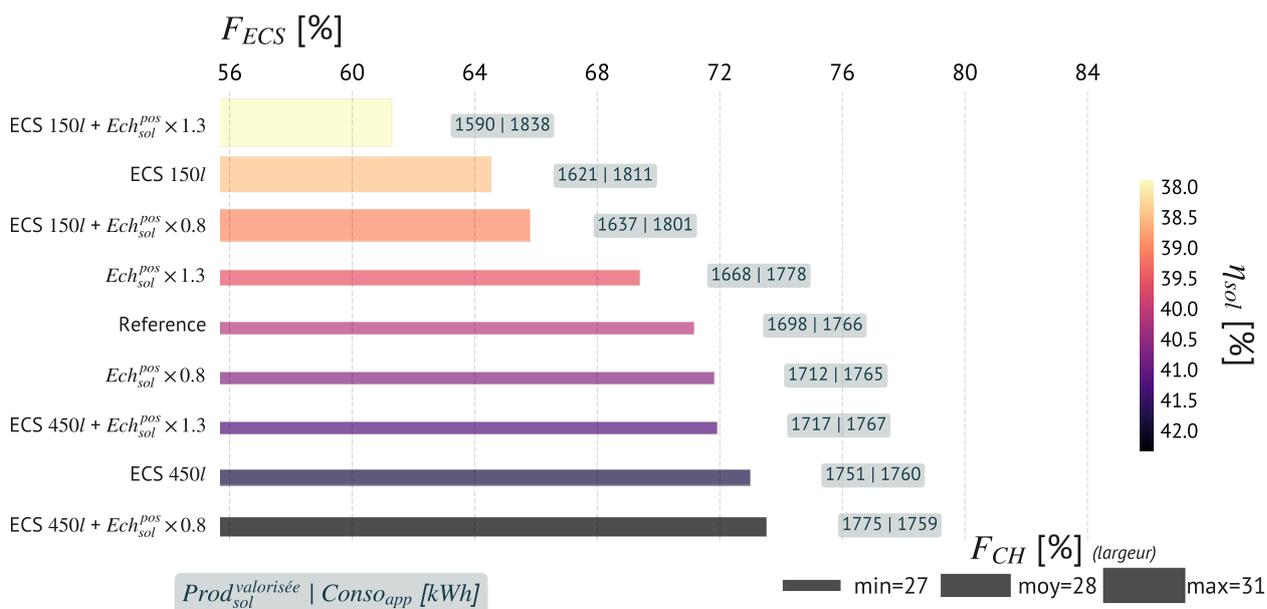


FIGURE II.22 – Impact de la position de l'échangeur solaire sur la performance du SSC à Strasbourg durant la période de chauffage (01/10 - 30/04).

Impact du profil de puisage

Dans cette avant dernière partie, l'impact des différents profils de puisage comme du volume de puisage est discuté. Puis, la prise en compte de coefficients modulateurs, mensuels et hebdomadaires est aussi détaillée. Pour rappel, les différents profils ne modifient pas la quantité puisée mais uniquement sa répartition dans le temps.

Les résultats obtenus pour Strasbourg montrent que le scénario de puisage n'impacte pas les différents indicateurs même si le scénario **Réaliste** améliore sensiblement la $Prod_{sol}^{valorisée}$ (Fig. II.23). Les résultats des simulations faisant varier le volume puisé montrent que le SSC est capable de fournir plus d'énergie solaire pour couvrir l'augmentation des besoins en ECS. Si on compare les deux consommations extrêmes (27 et 40 l/(jour.pers) (60°C)), la $Prod_{sol}^{valorisée}$ augmente de 248 kWh et la consommation de l'appoint de 390 kWh. Ainsi, le système s'adapte sans problème à différents profils de puisage et le F_{sol}^{ECS} et le F_{sol}^{CH} restent élevés même lorsque les besoins en ECS augmentent.

L'utilisation des coefficients mensuels n'affecte ni le F_{sol}^{CH} , ni la $Conso_{app}$ électrique sur le chauffage. Cependant le F_{sol}^{ECS} est fortement impacté, montrant une nouvelle fois l'importance d'évaluer de manière séparée le chauffage et la production d'ECS. Sur Bordeaux où l'ensoleillement est plus propice, la variation est moindre. Ces résultats montrent ainsi que les habitudes des occupants (prendre une douche plus longue ou plus chaude en hiver...), doivent être prises en compte afin d'évaluer correctement la performance du SSC. Ils montrent aussi que le choix du profil journalier n'est pas impactant lors de l'évaluation du SSC.

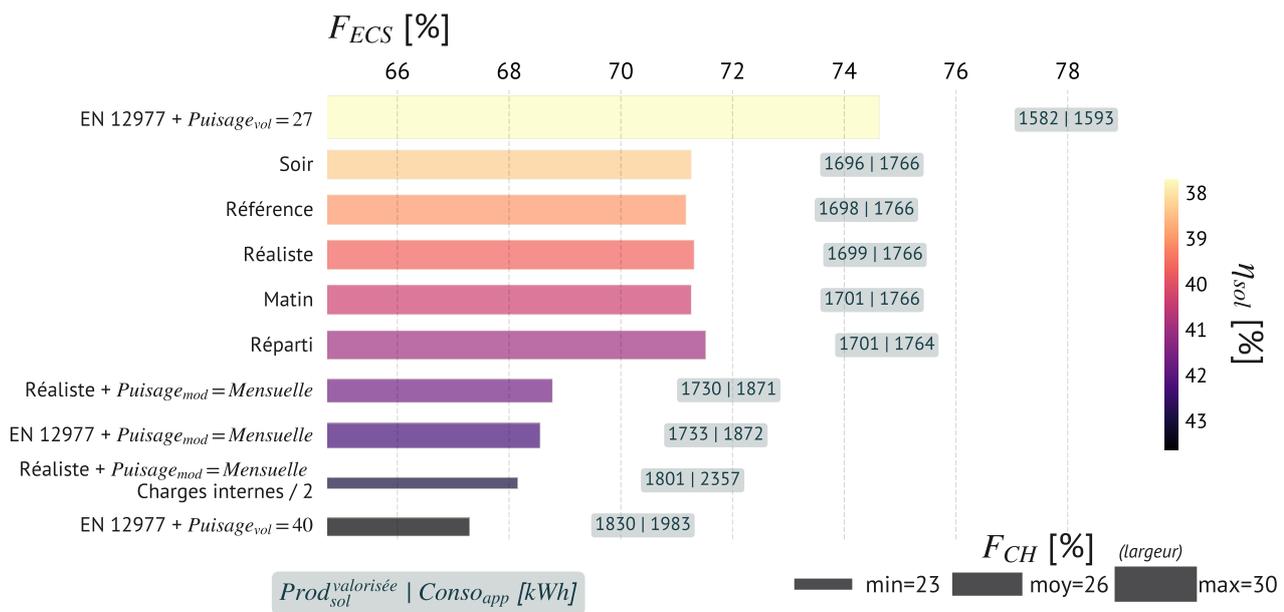


FIGURE II.23 – Impact du profil de puisage sur la performance du SSC à Strasbourg durant la période de chauffage (01/10 - 30/04).

Autres variations

Cette dernière partie discute des variations restantes qui sont plus communes lors de l'évaluation d'un SSC : le nombre ou la surface des capteurs, leur orientation et inclinaison, et leur performance au regard des caractéristiques techniques. Enfin, les variations algorithmiques sont aussi discutées.

L'inclinaison des capteurs jouent un rôle important dans la caractérisation de la performance d'un système SSC et affectent l'ensemble des indicateurs. Durant la période hivernale, une inclinaison importante (45 ou 60°) permet d'augmenter l'énergie récupérée par les capteurs et réduit les risques de surchauffe en période estivale. Sans surprise, le nombre de capteurs impacte fortement la consom-

mation de l'appoint. À Strasbourg, une variation de surface de capteurs de 14 m^2 (2 à 8 capteurs) fait varier le F_{sol}^{CH} de 11 % à 52 % et la $Conso_{app}$ varie de 2232 kW h à 1133 kW h. L'orientation joue aussi un rôle important sur la performance du SSC. À surface équivalente, des capteurs orientés au sud produisent deux fois plus que des capteurs à l'est.

Au niveau des variations algorithmiques, les temporisations n'impactent que faiblement le SSC. Augmenter la $Tempo_{souff}$ (15 min) améliore le F_{sol}^{ECS} mais dégrade le F_{sol}^{CH} . La $Tempo_{batterie}$ elle, n'a pas d'impact notable. Le ΔT_{sol} impacte le système solaire de manière modérée : l'augmenter dégrade à la fois le rendement solaire, le F_{sol}^{ECS} , et le F_{sol}^{CH} . À l'opposé le réduire permet de valoriser une plus grande quantité d'énergie solaire. Enfin, autoriser une sur-chauffage par le solaire durant la journée (consigne solaire à 22°C) améliore le F_{sol}^{CH} mais dégrade de manière plus importante le F_{sol}^{ECS} . Ainsi, la $Conso_{app}$ augmente. Ce résultat est cohérent avec les observations faites lors de l'évaluation des variations sur la ventilation (II.3.4) et montrent que l'énergie solaire est mieux valorisée si elle est attribuée en priorité pour la production d'ECS.

En résumé, les capteurs solaires thermiques doivent être placés en priorité sur un pan sud avec une inclinaison supérieure de 15° par rapport à la latitude du lieu afin d'améliorer les performances du SSC sur l'ensemble des indicateurs. Il apparaît aussi que le ΔT_{sol} impacte le système et doit donc être considéré. À l'opposé la surchauffe diurne impacte négativement le bilan global du système. Cependant, elle permet de favoriser le chauffage ou apporter un confort thermique hivernal plus important sans surcoût.

II.4 Vers une méthodologie d'aide à la décision

Au cours de ce chapitre, la démarche entreprise a été explicitée. Dans l'optique de mieux comprendre les interactions entre le bâtiment et le SSC, un modèle comprenant systèmes et bâtiment a été développé avec le langage *Modelica*. Pour le bâtiment, un modèle mono-zone a été retenu suite à une comparaison avec une approche multi-zones. Pour le SSC, une approche détaillée a été retenue afin de tenir compte de la complexité de la logique de contrôle. En effet un algorithme innovant et robuste a été utilisé afin d'orchestrer le fonctionnement couplé du bâtiment et du SSC. Finalement, une étude paramétrique a permis de mieux comprendre le comportement du SSC.

De nombreux paramètres dont la littérature avait montré l'impact ont été identifiés dans ces travaux et les conclusions sont similaires. Cependant d'autres paramètres et d'autres conclusions ont aussi été obtenus. Ce SSC est robuste, faire varier la température de consigne, supprimer le réducteur de nuit, ou encore modifier la répartition des puisages journaliers impacte de manière très sensible sa performance. Aussi, il a été mis en exergue que le F_{sol}^{ECS} et le F_{sol}^{CH} ne sont pas influencés de manière similaire en fonction des variations techniques. Le système est en effet capable de s'adapter : dans certains cas le F_{sol}^{ECS} est favorisé, dans d'autre c'est le F_{sol}^{CH} . Ce comportement est aisément observable lorsque le volume des ballons est modifié et que F_{sol} demeure intact mais où F_{sol}^{ECS} et F_{sol}^{CH} subissent de fortes variations. Il est donc indispensable de considérer de manière indépendante la performance du système solaire sur le chauffage (F_{sol}^{CH}) et sur la production d'ECS (F_{sol}^{ECS}). Il a aussi été mis en évidence que l'énergie solaire est mieux valorisée lorsque elle est en priorité utilisée afin de charger le ballon sanitaire. Ceci a en effet été noté à plusieurs reprises : lors de la charge diurne du bâtiment afin de réduire la $Conso_{app}$, ou bien lors de la variation du débit de ventilation. Cette étude a donc permis de confronter le modèle aux variations techniques communes dans l'étude des SSC mais aussi d'apprendre plus à travers d'autres variations au niveau du bâtiment, du SSC ou de son algorithme. Les résultats tendent à montrer que le SSC permet d'obtenir une couverture importante sur le chauffage comme la production ECS lorsque un algorithme détaillé est utilisé. Il est donc propice à l'utilisation pour des bâtiments à faible consommation.

Fort de ces résultats, trois indicateurs principaux ont pu être identifiés. La performance d'un SSC nécessite l'optimisation de la $Prod_{sol}^{valorisée}$ ainsi que de la $Conso_{app}$ pour le chauffage et la production d'ECS. Considérer uniquement la $Conso_{app}$ ne permet en effet pas de tenir compte des influences réciproques entre le SSC et le bâtiment illustrées à travers l'étude paramétrique. Dans l'optique d'une aide à la décision, il apparaît donc important de considérer à la fois la $Conso_{app}$, le F_{sol}^{ECS} , et le F_{sol}^{CH} . Cependant la méthodologie utilisée pour l'obtention de ces premiers résultats est guidée par l'expérience et son processus itératif est coûteux en temps humain. De plus cette approche ne permet pas de garantir l'obtention de solutions optimales. Pour ces raisons, une méthodologie d'aide à la décision tenant compte du caractère multi-objectifs propre à la conception de MEPOS solaire est introduite dans le chapitre qui suit. L'approche est automatisée et n'introduit pas de préférence a priori issue de l'expérience. Elle permet donc d'optimiser la puissance de calcul disponible libérant le temps humain pour la prise de décision.

CHAPITRE III

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'AIDE À LA DÉCISION

Le couplage d'une maison à énergie positive et d'un système solaire combiné a montré un potentiel intéressant à travers les premiers résultats obtenus. Cependant comme explicité dans le premier chapitre, une approche basée uniquement sur l'expérience telle qu'une étude paramétrique ne permet pas d'explorer l'espace des solutions potentielles. Dans cette optique, une méthodologie d'aide à la décision est présentée à travers ce chapitre. Dans un premier temps, le principe est explicité et le choix de l'approche argumenté. Ensuite, une fois l'approche choisie, les différentes étapes de la méthodologie sont décrites et les outils nécessaires détaillés. Afin de tenir compte du temps important d'évaluation, il est aussi introduit deux stratégies permettant de simplifier le modèle. Enfin en se basant sur une analyse bibliographique, une approche d'optimisation est proposée.

III.1 Les méthodes d'aide à la décision

III.1.1 Introduction

L'utilisation d'une méthode multi-critère d'aide à la décision (MCDA, Multi-Criteria Decision Analysis) fait toujours suite à une pré-analyse permettant d'évaluer la ou les raisons motivant sa formulation. Elle peut être définie comme le processus permettant d'obtenir des éléments de réponse ou des prescriptions à partir de l'ensemble des informations disponibles. D'après ROY (1996), un problème peut être classé suivant trois problématiques, à savoir, de choix, de tri, ou de classement. Dans les trois cas les différentes méthodes de MCDA nécessitent le respect de quatre étapes :

- Lister les actions potentielles
- Lister les critères à considérer
- Réaliser un tableau de performance
- Agréger les performances en un indicateur de décision

D'après ROY (1985),

« une action "a" est la représentation d'une éventuelle contribution à la décision globale, susceptible, eu à l'égard à l'état d'avancement du processus de décision, d'être envisagée de façon autonome et de servir de point d'application à l'aide à la décision (ce point pouvant suffire à caractériser a). »

L'ensemble des actions est évalué en fonction des critères qui devront si possible être indépendants. La construction des critères demande alors une connaissance importante du problème et implique fortement le ou les décideurs. En fonction des méthodes une pondération peut être nécessaire pour évaluer la force de la contribution de chaque action sur la décision finale. Il est important de noter que le processus d'aide à la décision n'est pas linéaire et ces étapes peuvent être répétées plusieurs fois.

À travers cette première étape, il est ainsi nécessaire de faire le bilan de la performance actuelle, le résultat espéré, et les pistes permettant de définir a priori comment ces outils peuvent apporter une réponse aux questionnements. L'expérience et les résultats obtenus en amont permettent alors d'alimenter la réflexion amenant à la formulation des critères et actions de manière précise nécessaire pour sélectionner une méthode d'aide à la décision adaptée. Lorsque le problème suggère une optimisation, il est nécessaire de définir les critères à optimiser. On parle alors des objectifs d'une optimisation multi-critère ou multi-objectifs. La définition des fonctions objectifs et des contraintes est propre à chaque problème et est directement dépendante des données disponibles. Dans le secteur du bâtiment, il est courant de considérer certaines sorties des logiciels de simulation dynamique (STD, CFD...) comme objectifs. ATTIA et al. (2013), montrent que dans le cas d'étude sur la performance des bâtiment passifs la consommation, le coût, et le confort sont couramment sélectionnés. Dans le cas de l'optimisation d'un SSC, les objectifs les plus utilisés sont le taux d'économie ($F_{sav,ext}$), le taux de couverture (F_{sol}), ou le Coût du Cycle de Vie (CCV).

Il est aussi nécessaire de définir les variables de décisions intéressantes a priori. Les variables peuvent être classées en deux grandes familles : les quantitatives et les qualitatives (Fig. III.1). Les variables quantitatives expriment une quantité à travers un nombre et peuvent être discrètes ou continues. On considère ainsi respectivement un nombre de valeurs discrètes (ex : épaisseur d'un isolant) ou une plage de variation définissant ces limites/bornes (ex : épaisseur d'une dalle en béton). Enfin, les variables qualitatives permettent de décrire une variation non ordonnable, dite catégorielle (ex : couleur) ou bien floue (ex : beau / laid).

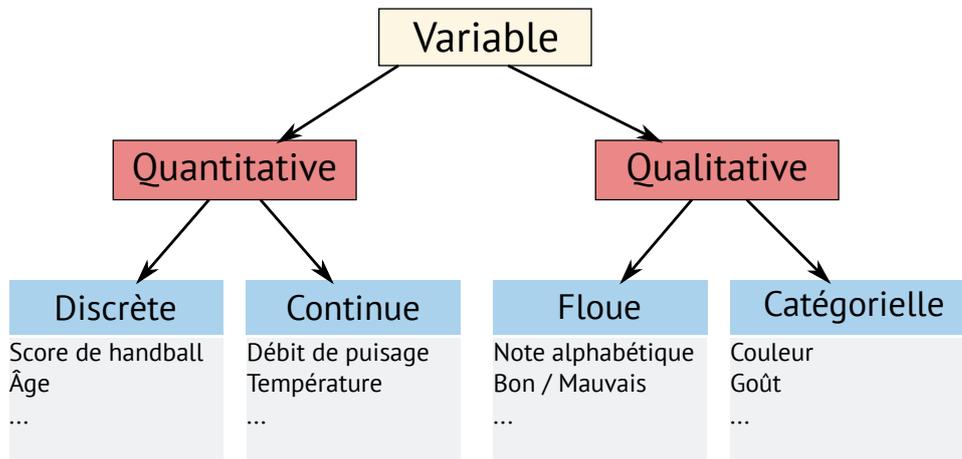


FIGURE III.1 – Description des catégories existantes pour une variable.

Des contraintes peuvent aussi être ajoutées afin de répondre aux exigences techniques en se basant sur les connaissances a priori du problème ou bien dans l’optique de limiter l’espace de recherche. On distingue deux types de contraintes. La première est définie a priori et l’impact n’est pas considéré durant le processus d’aide à la décision (ex : surface disponible en toiture pour installer des panneaux photovoltaïques). Le second type est plus complexe et ne peut pas être pris en compte en amont de l’analyse car des informations sont manquantes. On peut vouloir par exemple limiter un objectif ou éviter des combinaisons non réalisables. Ces contraintes sont donc partie intégrante de la méthode d’aide à la décision. Elles peuvent s’exprimer sous la forme de bornes, d’équations ou inéquations.

La suite de cette section vise à présenter de manière succincte les différentes approches existantes. Pour le lecteur intéressé, une introduction plus complète des MCDA ainsi que de nombreuses références sont proposées par MENA (2000). Finalement, l’optimisation multi-objectifs est décrite et l’approche retenue détaillée à travers une description complète de l’algorithme.

III.1.2 Les approches existantes

Décision a priori

Dans cette approche, le problème multi-objectifs est réduit à un problème mono-objectif. Ce processus de réduction est réalisé à l’aide de méthodes d’agrégation parmi lesquelles il est possible de citer les méthodes de pondération, de compromis, ou encore de distance (Fig. III.2). Dans tous les cas la réduction nécessite de normaliser les objectifs et le décideur introduit un caractère préférentiel. Dans le cas de la pondération, un coefficient est attribué à chaque objectif. Bien que algorithmiquement relativement simple à mettre en place, le choix des coefficients peut lui être complexe lorsque les divers objectifs ont des échelles ou unités différentes. La méthode du compromis, considère un objectif unique et les autres sont formulés sous forme de contraintes. Dans ces deux approches, les méthodes ne permettent d’obtenir qu’une seule solution à chaque itération. Finalement la dernière méthode permet d’optimiser les différents objectifs en calculant la distance de chaque solution par rapport à une solution de référence. Le choix du point de référence est alors déterminant (COLLETTE et SIARRY 2002), Fig. 2.10). Cette dernière approche est donc fortement dépendante de la position du point de référence et donc encore une fois de la connaissance a priori du problème.

Dans ces approches, l’introduction d’un caractère préférentiel lorsque la connaissance a priori est limitée implique une recherche biaisée dont le risque est d’écarter des zones de recherche qui pourraient être prometteuses. Ces méthodes ont cependant l’avantage de réduire la complexité en transformant un problème multi-objectifs en un problème mono-objectif. Cette nouvelle formulation assure ainsi de trouver une unique solution optimale au cours du processus d’optimisation.

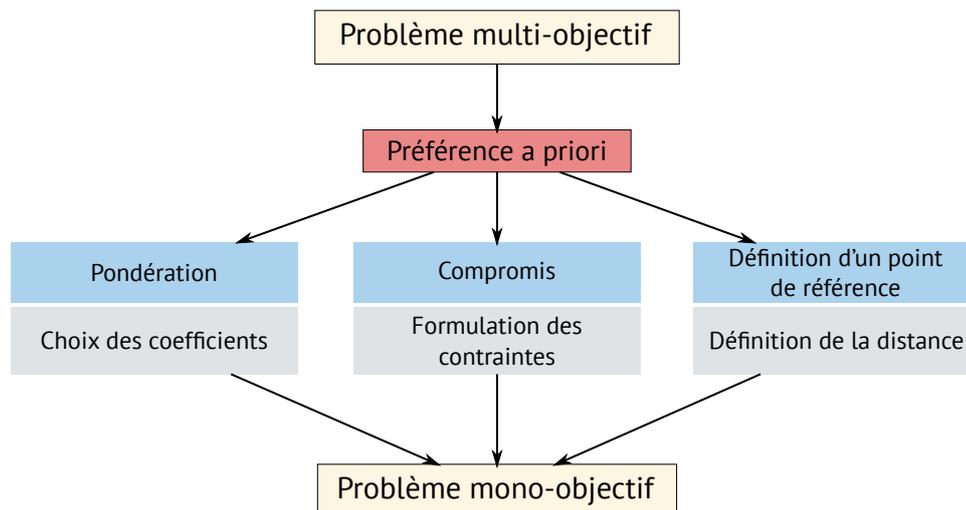


FIGURE III.2 – Transformation d'un problème multi-objectifs en optimisation mono-objectif.

Décision a posteriori

Contrairement aux autres approches, l'aide à la décision multi-objectifs a posteriori suppose qu'un ensemble de solutions optimales ait été généré grâce à un processus d'optimisation. Lors de l'optimisation aucun caractère préférentiel n'est introduit permettant ainsi d'explorer l'espace de décision sans restrictions. De plus ce processus permet d'améliorer la compréhension du problème et ainsi offrir une expertise plus importante : la formulation des préférences a posteriori est simplifiée. L'aide à la décision permet ainsi de trier, organiser ou encore sélectionner un ensemble de solutions dans l'espace de compromis formé par les solutions optimales. Ces solutions étant toutes considérées comme optimales, il est nécessaire d'introduire un caractère subjectif à travers l'expérience et les préférences du décideur. Plusieurs approches existent et peuvent principalement être classées en deux groupes, les approches par critère de synthèse ou les approches par surclassement.

Approche par critère de synthèse : Dans cette approche l'ensemble des objectifs est réduit à une note unique permettant de trier l'ensemble des solutions de l'espace de compromis. L'approche est similaire aux méthodes d'aide à la décision a priori mais est dans ce cas uniquement appliquée à l'ensemble formé par les solutions optimales. Dans cette configuration l'ordre est dit total : toutes les solutions sont comparables entre elles.

Une fonction unique dite d'utilité est formulée à partir de l'ensemble des critères de décision. Pour chaque critère, une fonction de valeur associée est construite en fonction de l'appréciation par le décideur en se basant sur des éléments subjectifs. L'ensemble de ces fonctions est ensuite agrégé afin de construire la note unique. De nombreuses techniques comme la somme, la moyenne, le produit, ou encore la distance pondérée sont utilisées pour réaliser cette agrégation. Les méthodes MAUT (Multiple Attribute Utility Theory) (FISHBURN 1970) ou AHP (Analytic Hierarchy Process) (SAATY 1987) sont deux exemples utilisant l'approche par critère de synthèse. Ces approches assurent l'obtention d'une solution unique mais comportent cependant un fort effet compensatoire dû à l'agrégation par pondération pour obtenir la note unique. Un critère ayant une valeur hautement pénalisante peut ainsi être retenu si les autres critères ont en moyenne une valeur élevée.

Approche par surclassement : Contrairement à l'approche par critère de synthèse, la méthode de surclassement permet de construire un ordre partiel entre les solutions : il peut exister des solutions non comparables après ce processus. Afin de classer les solutions, une relation de surclassement est définie entre les solutions optimales grâce à des éléments préférentiels. Une solution *a* surclasse une

solution b notée aSb si a est au moins aussi bon que b au regard des préférences du décideur.

Un ensemble de règles est alors défini pour chaque critère : préférence, indifférence, et seuils. Le surclassement est ensuite défini par un critère unique résultant de l'agrégation des critères pondérés par des coefficients. Selon les méthodes on distingue trois grands principes permettant d'éviter les effets compensatoires :

- Le principe de concordance stipule que la majorité des critères doivent vérifier la relation de surclassement.
- Le principe de non discordance stipule que les critères ne vérifiant pas la relation de surclassement ne doivent pas exprimer un désaccord trop important.
- Le principe de crédibilité qui vise à pondérer une hypothèse de surclassement en fonction de la pertinence du caractère préférentiel.

Les solutions sont ainsi comparées deux à deux permettant de réduire le nombre de solutions optimales dans le respect des préférences du décideur. Les méthodes *ELECTRE* ou encore *PROMETHEE* font partie des principales méthodes développées et la sélection d'une approche est liée au type de problématique. Dans une problématique de choix, la méthode *ELECTRE I* ou *IS* pourra être sélectionnée. Dans une problématique de rangement, les méthodes *ELECTRE II, III, ou IV* pourront être utilisées.

L'approche par surclassement ne souffre ainsi pas des problèmes de compensation mais ne garanti pas l'obtention d'une solution unique. L'ensemble des solutions finales est cependant fortement réduit.

Décision interactive

Dans cette approche le décideur oriente la recherche de manière itérative et le décideur intervient de manière récurrente pour orienter la recherche en fonction des résultats de l'optimisation. L'alternance entre optimisation, analyse, et sélection de nouvelles contraintes permet de réduire l'espace de recherche pour converger vers une solution répondant aux critères du décideur (CHING-LAI HWANG 1979). Cette méthode fait ainsi intervenir technicien et décideur de manière similaire aux approches a posteriori à l'exception que le processus est itératif et progressif. FLOURENTZOU et ROULET (2002) à travers le projet Européen TOBUS (Tool for selecting Office Building Upgrading Solutions) implémentent une méthode interactive afin d'aider à la création de scénarios de rénovation en tenant compte de nombreux critères comme les besoins énergétiques et le coût. L'outil informe aussi l'expert au fur et à mesure de la cohérence de son scénario permettant au décideur d'ajuster ses préférences.

Visualisation par coordonnées parallèles

Le tri par coordonnées parallèles a été introduit afin de permettre de visualiser sur un même graphe un nombre important de paramètres, là où les représentations graphiques plus classiques montrent leurs limites (INSELBERG et DIMSDALE 1987). Son utilisation est rapidement illustrée à travers le logiciel *XDAT*¹ qui permet de contrôler interactivement les bornes des paramètres grâce à un jeu de curseurs (Fig. III.3).

Chaque ligne représente une solution, et chaque colonne un critère de décision disposant de deux curseurs (min et max). À l'origine les curseurs sont positionnés sur les extremums : toutes les solutions sont donc visibles (Fig. III.3a). En contrôlant la position des curseurs, il est possible d'introduire de nouvelles contraintes et donc de conserver uniquement les solutions les respectant. Par exemple dans Fig. III.3b, la borne maximale pour le critère *température* est réduite et toutes les solutions violent

1. <http://www.xdat.org/>

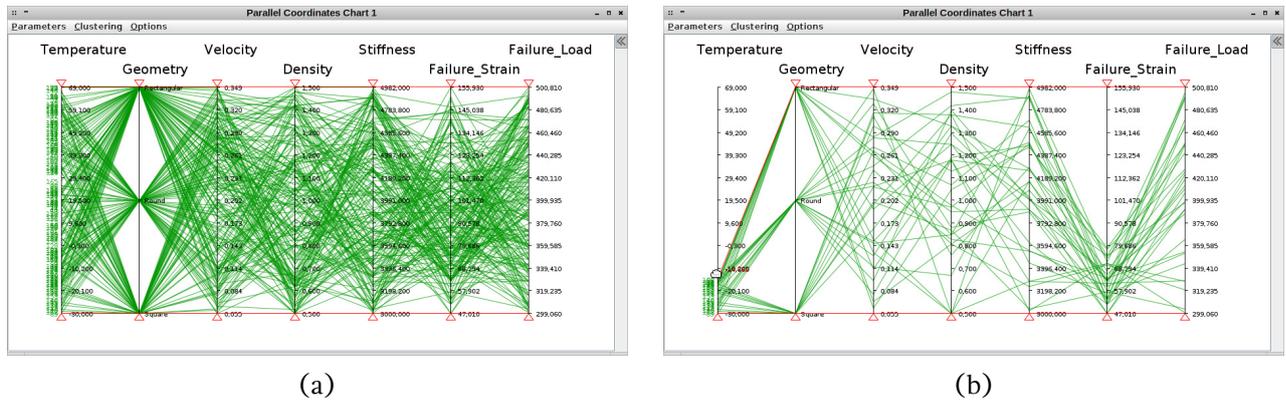


FIGURE III.3 – Principe de la visualisation par coordonnées parallèles (source²).

la nouvelle contrainte ne sont plus visibles. Cet outil est bien sûr aussi adapté pour mieux comprendre les relations existantes entre différentes solutions lorsque de nombreux paramètres entrent en jeu. Dans le cas de notre exemple, il est clairement mis en évidence que la contrainte de rupture (« failure strain ») est basse lorsque on ne retient que des solutions dont la température est elle aussi basse.

III.1.3 Approche retenue

L'aide à la décision dans le secteur du bâtiment fait intervenir de nombreux acteurs et le choix final est alors le résultat d'un compromis. Dans le cas de ces travaux, le bâtiment et le SSC sont dimensionnés simultanément et fonctionnent de concert. Le compromis est donc le résultat d'un choix à la fois, sur l'enveloppe du bâtiment, la logique de contrôle et les caractéristiques des systèmes du SSC. Il existe ainsi une combinatoire importante. Afin de ne pas écarter prématurément des solutions, une approche d'aide à la décision a posteriori a été retenue. L'ensemble des solutions optimales offre en effet une nouvelle connaissance sur le problème facilitant l'introduction de préférences pour l'aide à la décision. De plus, il a été montré que la reformulation d'un problème multi-objectifs sous la forme d'un objectif unique introduit un biais impactant directement la qualité de la solution finale (BLONDEAU et al. 2002). L'approche a posteriori apporte ainsi plus de souplesse dans l'aide à la décision et permet une meilleure exploration de l'espace de décision. Une fois la surface de compromis atteinte, l'introduction de la préférence du décideur permet de réduire le nombre de solutions et/ou de les classer. Dans ces travaux, un tri par coordonnées parallèles est retenu avec le logiciel XDAT. La méthode est intuitive, simple d'utilisation et permet de rapidement identifier un sous-espace de solutions. Elle est donc particulièrement adaptée pour l'aide à la conception de maisons solaires à énergie positive. En effet la conception d'un bâtiment fait intervenir de nombreux corps de métiers, le choix final est donc le résultat d'un compromis. Afin de l'obtenir, il est important que l'outil puisse être utilisé directement par les décideurs, qu'ils soient acteurs de la décision. Enfin dans l'optique d'une aide à la décision a posteriori, il est nécessaire de réduire la complexité du modèle et deux méthodes sont présentées dans la section suivante.

III.2 Simplification de modèles en thermique du bâtiment

L'aide à la décision a posteriori nécessite de réaliser préalablement une optimisation multi-objectifs afin d'identifier un ensemble de solutions optimales à partir desquelles le décideur sélectionne une solution à partir de ses préférences et contraintes. Cependant les modèles de simulation dynamique dans le bâtiment nécessitent un temps de calcul important non compatible avec des méthodes nécessitant de nombreuses évaluations comme certaines méthodes d'optimisation. Cette observation est particulièrement vraie dans notre cas : le modèle représentant le bâtiment et le SSC nécessite 1 h à

3 h pour une évaluation sur la période s'étendant du 1^{er} octobre au 30 avril (II.3.4) avec un ordinateur équipée d'un processeur *i7* – 4800MQ 2,7 GHz.

Afin de réduire la complexité du problème cette section présente deux méthodes. La première méthode permet de réduire la cardinalité du problème en amont de l'optimisation multi-objectifs. Le principe est de conserver uniquement les variables dont la modification a un impact sur les objectifs de l'optimisation grâce à l'analyse de sensibilité. La seconde approche permet d'approximer un modèle complexe afin de réduire la durée de simulation en utilisant des modèles de substitution.

III.2.1 Réduction de la cardinalité du problème

En amont de l'optimisation, les variables de décisions (facteurs) dont la variation sera étudiée sont sélectionnées sur la connaissance seule du système et des premiers résultats obtenus. Il apparaît donc opportun de réduire le nombre de facteurs afin d'éviter l'évaluation coûteuse du modèle pour des variations négligeables.

Les méthodes dites d'analyse de sensibilité permettent de répondre à cette problématique en identifiant les facteurs les plus influents au regard des objectifs retenus pour l'optimisation. Les facteurs non influents sont alors fixés (constants) réduisant la cardinalité du problème. Le processus d'optimisation est alors plus performant et moins coûteux.

Iooss (2011) propose un diagramme de décision (Fig. III.4) permettant de sélectionner la méthode la plus adaptée en fonction du temps nécessaire pour une évaluation, et du nombre de variables d'entrées. Il regroupe l'ensemble des méthodes existantes en deux grandes familles : les méthodes de criblage et les méthodes de décomposition de la variance. Il fait aussi la distinction entre les méthodes dites locales, évaluant les effets autour d'une position, et les méthodes dites globales, s'intéressant à l'ensemble du domaine de définition.

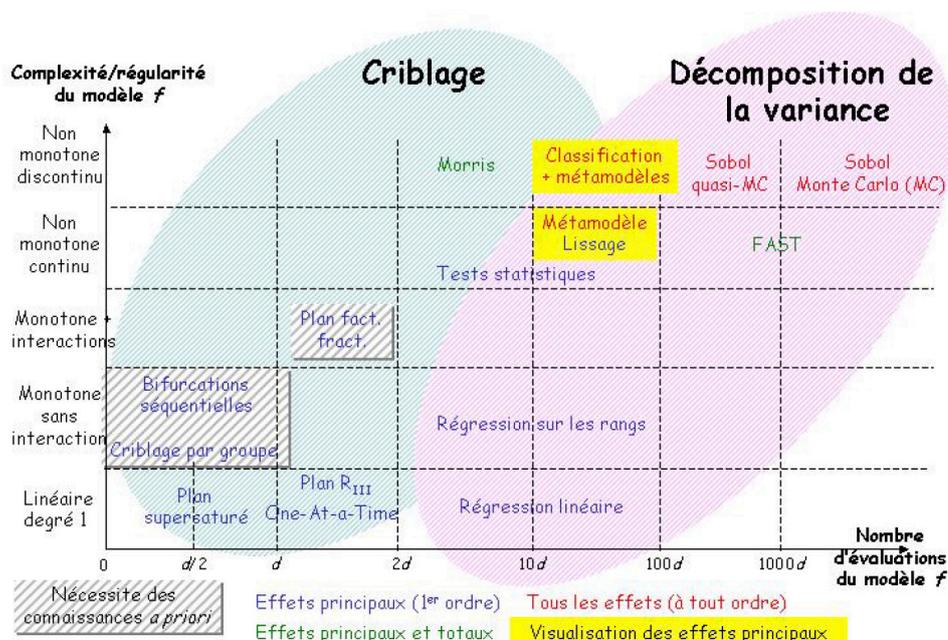


FIGURE III.4 – Classement des méthodes d'analyse de sensibilité selon Iooss 2011.

Dans notre cas, l'analyse de sensibilité choisie doit être globale, peu coûteuse, et identifier les facteurs non influents. Un classement quantitatif n'étant pas nécessaire, les méthodes de criblage et plus particulièrement la méthode de *Morris* a été sélectionnée.

La méthode de Morris

Il existe plusieurs méthodes de criblage, cependant la méthode de *Morris* (MORRIS 1991) est la plus flexible. Elle reste en effet valide lorsque le problème admet des facteurs qui se compensent ou lorsque le signe d'influence d'un facteur n'est pas connu a priori ou bien variable (SALTELLI et al. 2004).

Principe : La méthode de *Morris* utilise un plan OAT (One (Factor) At the Time) et est basée sur l'EEM (Elementary Effect Method) (SALTELLI et al. 2004). Chaque facteur (entrée) assume z valeurs discrètes appelées *niveaux* couvrant l'ensemble de la plage de validité. L'intervalle entre les différents niveaux est appelé *pas* (δ) et doit être un multiple de $\frac{1}{(z-1)}$. La littérature utilise couramment $\delta = \frac{z}{2 \times (z-1)}$ (CAMPOLONGO et al. 2007; MORRIS 1991).

La méthode consiste en l'évaluation des effets élémentaires (EE) pour R trajectoires (répétitions) à l'intérieur du plan OAT (Fig. III.5). Pour chaque trajectoire, une position de départ, puis la direction des variations élémentaires successives sont tirées aléatoirement. La méthode de *Morris* demande alors $R \times (j + 1)$ évaluations avec j le nombre de facteurs dont on cherche à évaluer l'influence. Pour chaque facteur, l'effet élémentaire associé est calculé permettant ensuite le calcul des indices de sensibilité. Le choix du nombre de trajectoires et du nombre de niveaux (dans une moindre mesure) impacte ainsi directement la qualité des indices de sensibilité : la littérature suggère $R \geq 10$ et de $z = 4$ (CAMPOLONGO et al. 2007).

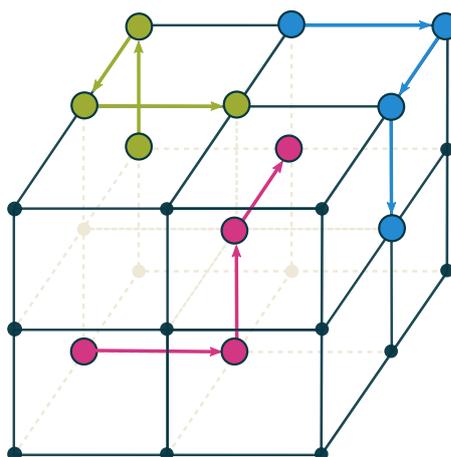


FIGURE III.5 – Illustration du fonctionnement de la méthode de *Morris* pour la création de 3 trajectoires ($R = 3$, $z = 3$, $j = 3$) d'après MUNARETTO (2014).

Interprétation : La première implémentation de la méthode permet d'évaluer qualitativement l'influence de chaque facteur grâce à la moyenne, μ (III.1) et à l'écart type, σ (III.2). La moyenne permet d'évaluer les effets linéaires, et l'écart type d'identifier les influences non linéaires ou les interactions entre facteurs. En effet, plus σ est important par rapport à μ , plus l'hypothèse de non linéarité ou d'interactions est probable.

$$\mu = \sum_{r=1}^R \frac{EE_r}{R} \quad (\text{III.1})$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{r=1}^R \frac{(EE_r - \mu)^2}{R}} \quad (\text{III.2})$$

CAMPOLONGO et al. (2007) améliorent la méthode en proposant deux modifications. La première est l'ajout de la moyenne absolue, μ^* (III.3). Cet indicateur permet de voir l'importance des facteurs dont le signe de l'influence est variable contrairement à la moyenne (à cause des compensations dues aux signes).

$$\mu^* = \sum_{r=1}^R \frac{|EE_r|}{R} \quad (\text{III.3})$$

La méthode permet ainsi de classer les facteurs en trois catégories :

- Non-influent ou effets négligeables
- Influent avec des effets sans interactions et linéaires
- Influent avec des effets non-linéaires ou des interactions

La seconde modification proposée est la génération d'un grand nombre de trajectoires, dans lesquelles, R trajectoires dissimilaires sont sélectionnées. La méthode de sélection proposée est cependant faite par « Brute force » et demande donc une puissance de calcul importante. Afin de pallier ce problème, RUANO et al. (2012) proposent une approximation de la méthode par « Brute force » pour un temps de calcul très court permettant d'obtenir une sélection représentative et hétérogène des trajectoires.

Analyse : La méthode recommandée dans la littérature pour évaluer les résultats de l'analyse consiste à tracer graphiquement le plan $(\sigma, \mu$ ou $\mu^*)$. Il est ainsi possible de juger de l'importance globale d'un facteur visuellement. Enfin la distance normalisée notée *distance* (III.4), permet de classer l'ensemble des indicateurs sur un même graphe à l'aide d'une représentation en diagramme à barre renseignant l'ordre relatif au sein des facteurs évalués. Il est cependant important de noter que *distance* est une distance normalisée. Il existe ainsi toujours un facteur pour lequel *distance* = 1 et un autre pour lequel *distance* = 0. Ces deux méthodes sont ainsi complémentaires.

$$\begin{aligned} distance &= \sqrt{\mu^{*2} + \sigma^2} \\ \hat{distance} &= \frac{distance - distance_{min}}{distance_{max} - distance_{min}} \end{aligned} \quad (\text{III.4})$$

Le principe est illustré par Iooss (2011) à travers deux résultats obtenus pour deux objectifs différents mais pour les mêmes critères (Fig. III.6). Les résultats pour l'objectif en partie gauche permettent alors de dire que les facteurs Z_v , Q, C_b et H_d sont influents avec des effets linéaires car pour tous ces facteurs $j : \sigma_j \ll \mu_j^*$. De plus, Z_v , Q, et H_d sont impactants car leur moyenne absolue (μ^*) est élevée. Enfin, K_s a une influence non linéaire ou avec interactions car son écart type (σ) est important et $\sigma_{K_s} \sim \mu_{K_s}^*$. Les résultats pour l'objectif en partie droite montrent eux que les facteurs K_s , Z_v , Q, C_b , et H_d ont des effets non-linéaires ou avec interactions : $\sigma_j \sim \mu_j^*$. Finalement au regard de ces deux sorties, la méthode de criblage de Morris permet d'écarter les variables L, B, et Z_m qui apparaissent comme non influentes sur les deux sorties considérées.

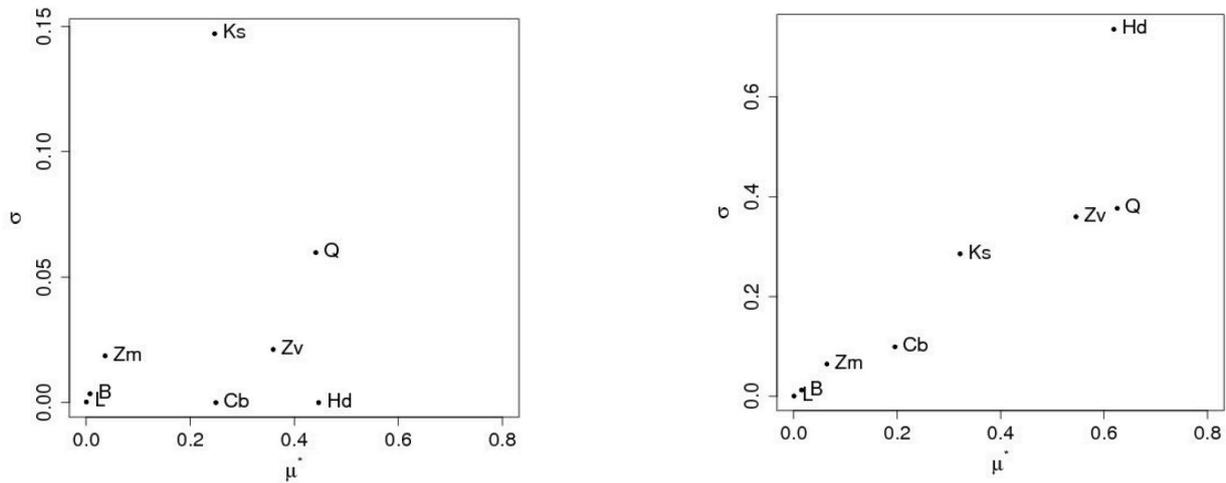


FIGURE III.6 – Résultat de la méthode de *Morris* ($R = 5$, $z = 4$, $j = 8$) pour deux sorties distinctes mais les mêmes facteurs (Iooss 2011).

III.2.2 Modèles de substitution

Principe

Dans la partie précédente, une méthode réduisant la cardinalité du problème, et donc le nombre de combinaisons existantes en amont a été décrite. Cette section présente une autre approche ne se substituant pas à la première mais venant la compléter : les modèles de substitution. Ces modèles permettent de conserver la précision d'un modèle complexe tout en réduisant significativement le temps de calcul nécessaire par évaluation. Le principe est d'approximer les sorties d'intérêts (objectifs) par une fonction analytique appelée méta-modèle. Cette fonction analytique sera ensuite utilisée pour évaluer les différentes combinaisons existantes à la place du modèle complexe et coûteux.

L'utilisation de méta-modèle s'est fortement développée, et ce pour des applications diverses. Certains les utilisent pour faire de l'optimisation, d'autres dans l'optique de réaliser une analyse de sensibilité détaillée avec des méthodes de décomposition de la variance (voir Fig III.4). ARMAND-DECKER (2015) les utilise en substituts à un modèle de bâtiment réalisé sous *Energy Plus* afin de réduire le temps nécessaire pour l'optimisation multi-objectifs d'un bâtiment multi-étages en bois. Plus récemment, FAGGIANELLI et al. (2017) a utilisé les méta-modèles dans le cadre de garantie de performance pour un bâtiment de bureaux. Après réduction du nombre de facteurs grâce à la réalisation d'un criblage de *Morris*, plusieurs méthodes permettant l'obtention des indices de *Sobol* sont comparées. Les résultats montrent que l'utilisation de méta-modèles est tout à fait pertinente et offre de plus un bon compromis entre temps de calcul et précision. Ainsi dans notre cas, où le temps nécessaire pour une simulation est important, l'utilisation de méta-modèle a un potentiel très intéressant. De plus, cette approche est adaptable car elle permet d'encapsuler un modèle complexe dans des outils métiers. Il est alors possible de répondre dans un temps très court à un problème spécifique sans la complexité d'un logiciel de modélisation.

L'approche comporte cependant des désavantages. Pour leur création, il est nécessaire d'évaluer le modèle complexe sur un échantillon représentatif de l'espace des entrées. Le méta-modèle est donc limité par les conditions retenues lors de sa création, comme les variables d'entrées, ou leurs bornes. La modification d'un de ces paramètres nécessite donc la création d'une nouvelle fonction de substitution. Enfin, il est important d'évaluer la taille de l'échantillon nécessaire pour construire un méta-modèle adapté. Il n'est en effet pas forcément possible de construire un modèle répondant de manière satisfaisante aux différentes sollicitations pour une taille raisonnable de l'échantillon. Dans l'optique d'une optimisation il est ainsi important de prendre les points suivants en considération :

- Le nombre de simulations nécessaires pour créer le méta-modèle
- Le nombre de simulations nécessaires pour l'optimisation sans méta-modèle
- Le type des variables d'entrées (continue, discrètes...)
- L'utilité à terme de l'outil d'optimisation / d'aide à la décision

Construction

Il existe plusieurs moyens permettant de construire un méta-modèle. Dans ces travaux l'implémentation réalisée par MERHEB (2013) à l'aide de l'algorithme décrit par MALEN et al. (2009) est retenue. Le chaos polynomial ou décomposition par polynômes du chaos (PC) est une méthode permettant d'approximer une sortie du modèle original ($Y = f(\vec{x})$) grâce à un modèle analytique simplifié appelé méta-modèle. Il est noté $\mathcal{M}(\vec{x})$ où \vec{x} est de dimension D avec D le nombre de variables d'entrées $x_j (j \in \{1, 2, \dots, D\})$ (III.5).

$$Y = f(\vec{x}) \approx \mathcal{M}(\vec{x}) \quad (\text{III.5})$$

Dans un premier temps un échantillon représentatif de l'ensemble des données d'entrées est nécessaire. Une méthode de Monte-Carlo couplée à une suite à discrétance faible est retenue : la méthode de Quasi-Monte-Carlo (CAFLISCH 1998). Contrairement à la méthode de Monte-Carlo, une suite ayant une discrétance faible telle que la suite de Halton, (Fig. III.7) permet de maintenir un ensemble de points uniformément répartis même lorsque le nombre de points générés est faible. L'ensemble des points des deux échantillons a été généré à partir d'une distribution uniforme et les tirages sont strictement identiques (même graine). Il peut être noté que l'échantillon par Quasi-Monte-Carlo est une méthode plus robuste car elle couvre mieux le domaine de définition.

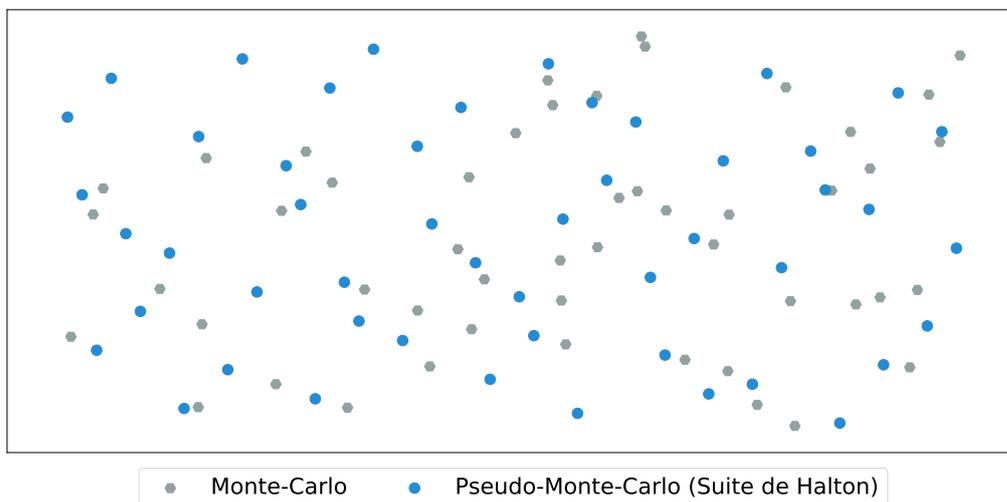


FIGURE III.7 – Échantillon pseudo aléatoire suivant la méthode de Monte-Carlo et de Quasi-Monte-Carlo (suite de Halton) pour deux paramètres suivant une distribution uniforme.

La seconde étape consiste à construire le méta-modèle à partir d'une partie de l'échantillon simulé. Le principe des polynômes du chaos est d'approximer une variable d'intérêt par une série de polynômes orthogonaux dépendant de chaque variable d'entrées aléatoires. Initialement développée par WIENER (1938), la forme généralisée du *chaos polynomial* est introduite par XIU et KARNIADAKIS (2002) (III.6). La généralisation permet d'associer à chaque variable d'entrée aléatoire, une famille de polynômes orthogonaux en fonction de la loi de distribution retenue. Étant en phase de conception

et cherchant à explorer l'ensemble du domaine de recherche, une loi uniforme est considérée pour chaque paramètre. Ainsi chaque paramètre se voit associé une base polynomiale de *Legendre*.

$$Y = \mathcal{M}(\underline{x}) = \sum_{\vec{\alpha} \in \mathbb{N}^D} c_{\vec{\alpha}} \times \psi_{\vec{\alpha}}(\underline{x}) \quad (\text{III.6})$$

Où \underline{x} est le vecteur des composants indépendants définis à partir des variables d'entrées (\vec{x}) et de leur distributions de probabilités respectives. $c_{\vec{\alpha}}$ sont les coefficients caractéristiques du développement en série, et $\psi_{\vec{\alpha}}(\underline{x})$ sont les vecteurs de la base de polynômes à variables multiples. Elle sont construites par tensorisation des familles respectives associées à chaque variables (III.7) où $\{\pi_p^{(j)}, p \in \mathbb{N}\}$ est la famille de polynômes orthonormés associée à la variable x_j .

$$\psi_{\vec{\alpha}}(\underline{x}) = \prod_{j=1}^D \pi_{\alpha_j}^{(j)}(x_j) \quad (\text{III.7})$$

Pour des raisons numériques, un ordre maximal total (P) est défini (III.6) afin de tronquer le développement en série : les polynômes dont le degré total est inférieur ou égal à P sont exclus (III.8).

$$Y = \mathcal{M}(\underline{x}) \approx \sum_{|\vec{\alpha}| \leq P} c_{\vec{\alpha}} \times \psi_{\vec{\alpha}}(\underline{x}) \quad (\text{III.8})$$

La construction d'un méta-modèle se traduit donc par la détermination des ensembles de coefficients $\{c_{\vec{\alpha}}, |\vec{\alpha}| \leq P\}$ permettant de minimiser l'erreur d'approximation entre le modèle original et le modèle de substitution. La minimisation est réalisée par la méthode des moindres carrés et consiste à minimiser l'erreur quadratique entre le modèle de substitution et le modèle original.

Finalement la dernière étape permet de valider le modèle obtenu. Afin de pouvoir vérifier que le modèle se comporte correctement sur l'ensemble du domaine de définition, 90 % de l'échantillon sera utilisé pour construire le méta-modèle et les 10 % restants sont utilisés afin de le valider. De plus le nombre minimal d'évaluations nécessaires pour la construction des méta-modèles sera aussi investigué. Les méta-modèles associés aux objectifs et contraintes étant propres au cas d'étude, le détail de leur construction est décrit à travers le cas d'étude dans le dernier chapitre.

III.2.3 Approche retenue

La méthodologie retenue (Fig. III.8) est dans la continuité de l'approche décrite dans le chapitre précédent. Dans un premier temps la modélisation est réalisée de manière itérative et une étude paramétrique permet de définir les différents paramètres clés (objectifs, contraintes, variables, bornes...). Ensuite, la cardinalité du problème est réduite grâce à la méthode de *Morris* appliquée sur chaque objectif et contrainte. Le problème résultant est alors substitué par un ensemble de méta-modèles afin de fortement réduire le temps de calcul nécessaire pour une évaluation. Les modèles de substitution obtenus sont finalement utilisés pour réaliser l'optimisation multi-objectifs dans l'optique d'une aide à la décision a posteriori. Une fois les solutions optimales obtenues, le décideur pourra grâce à une méthode de réduction par coordonnées parallèles sélectionner la solution correspondant à ses préférences. En parallèle, l'optimisation sera réalisée avec le modèle d'origine afin d'évaluer le gain apporté par les modèles de substitution.

Afin d'appliquer cette méthodologie, il est maintenant nécessaire de définir une approche d'optimisation adaptée. La section suivante introduit ainsi l'optimisation multi-objectifs, ainsi que les différentes méthodes existantes parmi lesquelles le choix sera argumenté.

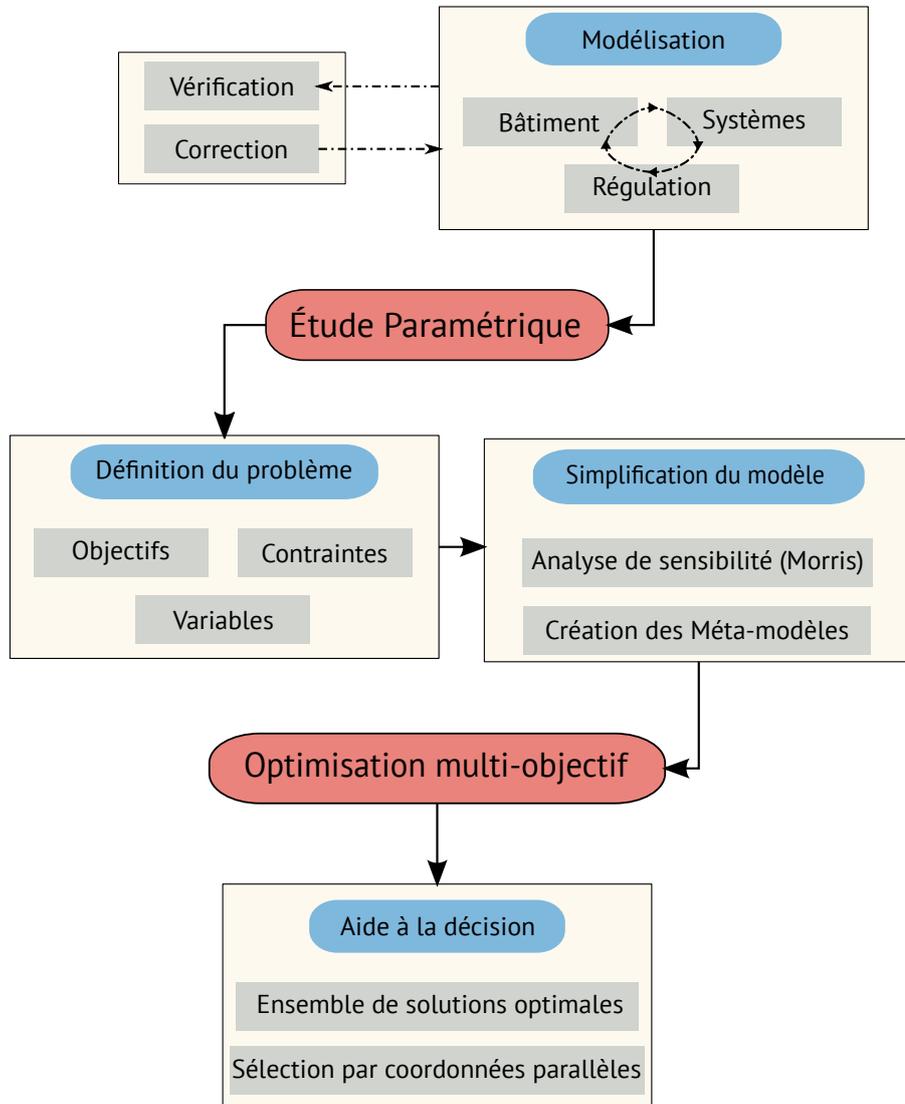


FIGURE III.8 – Description de la méthode d’aide à la décision envisagée.

III.3 Sélection d’une approche d’optimisation multi-objectifs

Dans le domaine de la thermique du bâtiment la caractérisation de la performance est souvent effectuée de manière itérative à partir d’une solution de référence ou bien de manière empirique dans l’espace de décision. La direction et les variations évaluées résultent dans la plupart des cas de l’expérience du ou des décideur[s]. La recherche est alors fortement biaisée en amont, limitant l’exploration d’alternatives et l’obtention d’une solution optimale est alors peu probable. Cette tendance est renforcée dans notre cas où une évaluation couplée du SSC et du bâtiment est considérée. Afin de pallier ces problèmes, des méthodes dites d’optimisation ont été développées. Dans un premier temps le vocabulaire propre à l’optimisation est introduit et une description succincte des méthodes existantes appliquées aux bâtiment est discutée.

III.3.1 Vocabulaire et Définition

Un problème d’optimisation multi-objectifs (Déf. 4) est défini par un espace de recherche et de solution multi-dimensionnel contrairement à une approche mono-objectif où seul l’espace de recherche est multi-dimensionnel. Afin de pouvoir classer et sélectionner les solutions entre elles, il est alors nécessaire de définir un nouvel opérateur de classement : la relation de dominance. L’approche la plus répandue ne considère pas de caractère préférentiel et repose sur le principe de dominance au sens de

Pareto (Déf. 5). Parmi les méthodes existantes, certaines comme l'approche lexicographique introduisent une préférence tout en conservant la nature multi-objectif du problème. Dans cette approche les objectifs sont classés selon un ordre d'importance et la comparaison est faite dans le respect de cet ordre. Le lecteur intéressé est invité à consulter COLLETTE et SIARRY (2002) afin d'obtenir plus d'informations.

Définition 4 (Optimisation multi-objectifs)

L'optimisation multi-objectifs est le processus visant à minimiser ou maximiser un ensemble d'objectifs tout en respectant un nombre fini de contraintes. Il peut être formulé de la manière suivante dans le cas d'une minimisation :

$$\begin{aligned} \min_{\vec{x} \in \mathbb{R}^D} (\vec{f}(\vec{x})) \quad & (f_m)_{m \in [1, \dots, M]} \mapsto \mathbb{R} \\ \text{Sujet à : } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \quad & (g_q)_{q \in [1, \dots, Q]} \mapsto \mathbb{R} \\ \vec{h}(\vec{x}) = 0 \quad & (g_c)_{c \in [1, \dots, C]} \mapsto \mathbb{R} \end{aligned} \tag{III.9}$$

Avec \vec{x} représentant la valeur des D variables de décision et $\vec{f}(\vec{x})$ l'ensemble des M fonctions objectif. $\vec{g}(\vec{x})$ et $\vec{h}(\vec{x})$ représente respectivement les Q contraintes d'inégalité et C contraintes d'égalité imposées au problème d'optimisation. L'optimisation multi-objectifs est donc le processus qui cherche à améliorer la qualité des solutions en faisant varier la valeur des variables de décisions (\vec{x}). Lorsque $C > 0$ ou $Q > 0$ on parle de problème d'optimisation sous contraintes.

Définition 5 (Dominance au sens de Pareto)

On considère qu'un vecteur de décision, \vec{x}_a domine un autre \vec{x}_b si :

- \vec{x}_a est aussi bon que \vec{x}_b sur tous les objectifs
- \vec{x}_a est meilleur que \vec{x}_b sur au moins un objectif

Cette relation sera notée : $\vec{x}_a < \vec{x}_b$. Un point est ainsi dit optimal au sens de Pareto lorsque aucun autre point dans l'ensemble le comprenant ne le domine (Fig. III.9).

Dans ces travaux la relation de dominance au sens de Pareto a été retenue car elle n'introduit pas de préférence a priori. La surface de compromis sera ainsi décrite comme équivalente au front de Pareto (Déf. 6).

Définition 6 (Front de Pareto : PF)

Il représente l'ensemble formé par les solutions non-dominées (espace des objectifs) dont les vecteurs de décisions sont non-dominés (Fig. III.9). Le front de Pareto est donc la représentation dans l'espace des objectifs de l'ensemble optimal de Pareto qui lui est défini dans l'espace de décision. Cette relation sera notée :

$$\begin{aligned} \text{PF} &= \{ \vec{f}(\vec{x}_*), \vec{x}_* \in \text{POS} \} \\ \text{POS} &= \{ \vec{x}_* \in \mathbb{R}^D \mid (\nexists \vec{x} \in \mathbb{R}^D) \vec{f}(\vec{x}) < \vec{f}(\vec{x}_*) \} \end{aligned} \tag{III.10}$$

avec POS l'ensemble optimal de Pareto (Pareto Optimal Set) et PF le front de Pareto (Pareto Front).

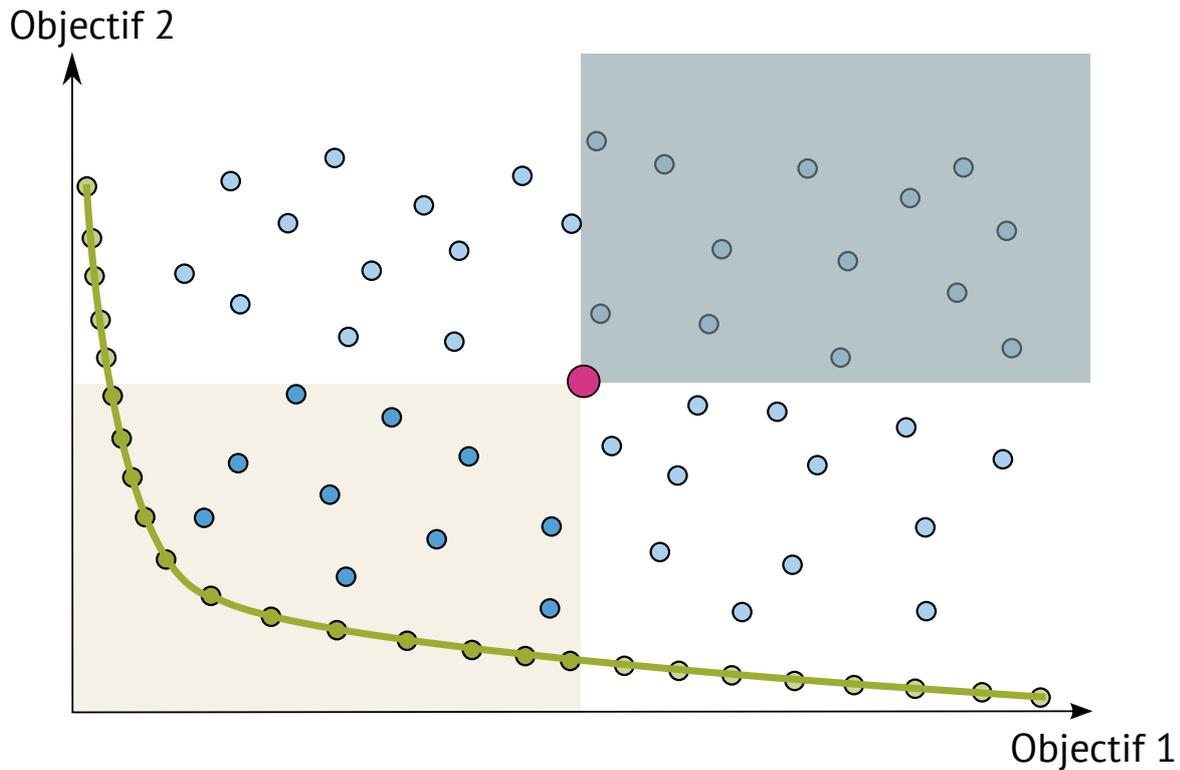


FIGURE III.9 – Dominance au sens de Pareto pour le point de référence de couleur rose. Les solutions de la zone grisée et de la zone couleur crème sont respectivement dites dominées et dominantes. La zone blanche représente les solutions non-dominées et les solutions de couleur verte forment le front de Pareto (Déf. 6).

Points de référence

Afin de guider la convergence, certaines méthodes utilisent la position singulière de certains points dans l'espace des objectifs.

Le point idéal : Point dans l'espace des objectifs dont les coordonnées correspondent à l'optimal de chaque objectif pris séparément (Fig. III.10). Ce point peut être utilisé pour guider la recherche. Cependant dans la plupart des cas, ce point n'est pas une solution du problème multi-objectifs dont les objectifs le composant sont le plus souvent antinomiques.

Le point Nadir : Point ayant pour coordonnées la valeur de la borne supérieure (cas d'une minimisation) de chaque objectif du front de Pareto (Fig. III.10). Si ce point est connu, il peut être utilisé pour restreindre l'espace de recherche ou évaluer la qualité des solutions trouvées.

La convexité

Ce terme permet de caractériser la forme d'un ensemble. Dans le cas de fronts continus, on parle alors de fronts convexes ou non-convexes (COLLETTE et SIARRY 2002). Un ensemble est dit *convexe* lorsque pour deux points distincts, la droite les reliant est contenue dans cet ensemble (Fig. III.10(a)). À l'inverse si l'ensemble ne contient pas la droite, il est non-convex (Fig. III.10(b)). Ce terme est aussi utilisé pour décrire la forme du front de Pareto dans le cas de problèmes multi-objectifs.

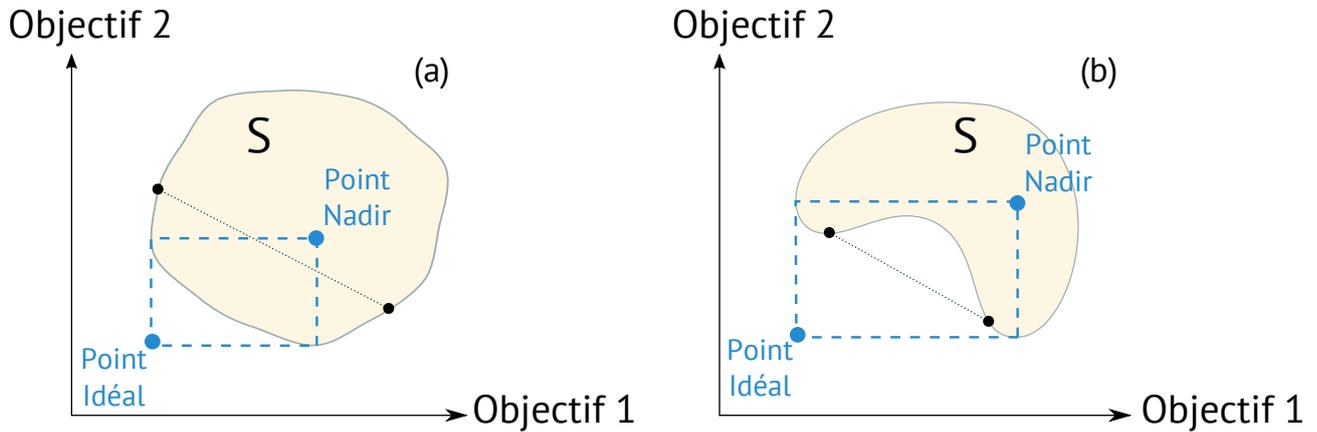


FIGURE III.10 – Illustration du Point Idéal et du point Nadir sur une minimisation à deux objectifs d'un ensemble S pour un front convexe (a) et non convexe (b).

III.3.2 Les méthodes exactes

Ces méthodes regroupent l'ensemble des sous-méthodes permettant de caractériser l'ensemble des solutions (Fig. III.11) détaillées ci-après. Elles sont cependant coûteuses car un nombre très important de simulations est requis.

La méthode énumérative

Cette approche garanti la découverte du front de Pareto complet car l'ensemble des combinaisons entre les différentes variables de décision est évalué. À mesure de l'augmentation de la cardinalité de l'espace de décision, le nombre de simulations requis augmente exponentiellement.

Algorithmes de chemin optimal

Ces approches permettent de trouver un chemin optimal à l'intérieur d'un problème représenté à l'aide de graphes. Contrairement aux approches exhaustives, l'ensemble des solutions n'est pas nécessairement évalué. Cependant ces approches nécessitent la formulation du problème sous la forme d'un graphe ainsi que la connaissance de la solution à atteindre. L'approche la plus courante est l'utilisation de l'A* ou d'une de ses dérivées (HART et al. 1968).

Programmation dynamique

Cette approche se base sur la résolution de sous-problèmes pour résoudre le problème global et se représente aussi sous forme d'un graphe. La recherche à l'intérieur du graphe est basée sur le théorème de Bellmann qui stipule qu'un chemin optimal ne peut être composé que de sous-chemins optimaux. Cette approche permet ainsi de garantir l'obtention de toutes les solutions optimales tout en réduisant le nombre d'évaluations nécessaires. Cette approche est particulièrement adaptée à l'optimisation de processus séquentiels. RIVALLAIN (2013) l'utilise pour optimiser un bâtiment similaire à la barre de Grimaud « un bâtiment collectif résidentiel de 4 étages, situé en banlieue Sud de Paris (Sainte Geneviève des Bois) ». Le bâtiment comprend 10 appartements pour une surface totale habitable de 792 m². Les solutions obtenues grâce à la programmation dynamique sont ensuite comparées au résultat obtenu avec une méthode dite approchée. Ces approches sont discutées dans la section suivante.

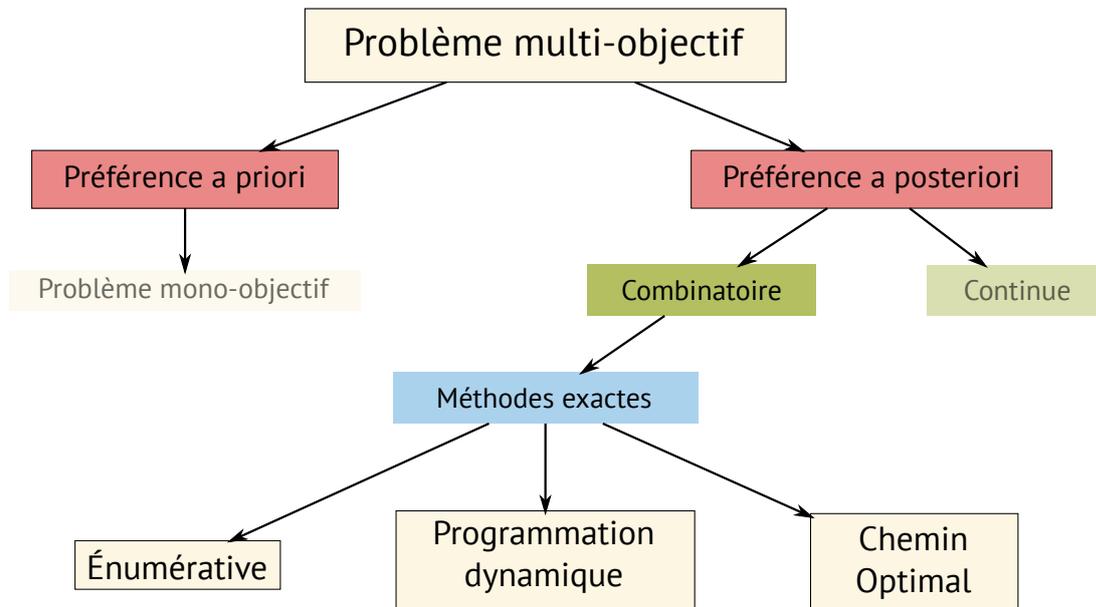


FIGURE III.11 – Transformation d'un problème multi-objectifs en optimisation par méthodes exactes.

III.3.3 Les méthodes approchées

Ces approches contrairement aux approches exactes ne garantissent pas l'obtention de l'ensemble du front de Pareto mais le nombre d'évaluations nécessaires est fortement réduit. On distingue deux familles, les heuristiques, et les méta-heuristiques. Une heuristique est spécifique au problème que l'on cherche à résoudre et est inspirée de l'expérience ou des contraintes du problème. Elle représente ainsi une solution souvent sous-optimale ou non réalisable et est définie empiriquement afin de guider la recherche vers l'optimum. L'utilisation d'une heuristique permet ainsi d'accélérer la recherche mais sa définition peut être délicate pour des problèmes complexes tout en garantissant la convergence vers la ou les solutions exactes. Une heuristique qui permet d'accélérer la recherche tout en garantissant l'obtention d'une solution optimale est dite admissible.

Considérons le problème suivant : trouver la distance minimale pour aller d'un point A à un point B en considérant plusieurs obstacles (Fig. III.12). Les positions de départ et d'arrivée étant connues, ce problème peut être résolu de manière exacte avec l'algorithme A^* (III.3.2) si on définit une heuristique admissible.

Afin de résoudre ce problème, la connaissance de la solution pour un cas plus simple, la distance entre A et B sera utilisée : c'est l'heuristique (Fig. III.12). Si seuls les mouvements verticaux et horizontaux sont admissibles alors la distance minimale est la distance de Manhattan. Dans le cas où les mouvements en diagonale sont aussi admissibles la distance entre ces deux points sera la distance euclidienne. La recherche favorisera ainsi dans un premier temps les mouvements réduisant cette distance afin de concentrer la recherche vers les chemins prometteurs.

Comme nous venons de le voir une heuristique est fortement liée au problème et doit tenir compte de ces contraintes propres. Cependant dans l'optimisation multi-objectifs combinatoire appliquée au bâtiment cette connaissance est souvent trop limitée et la définition d'une heuristique risque d'amener un biais trop important.

Dans l'optique d'une formulation plus générale, des méta-heuristiques ont ainsi été développées. Ces formulations utilisent un processus stochastique couplé à des éléments d'apprentissage afin de guider la recherche et éviter l'évaluation complète des solutions (voir III.3.2).

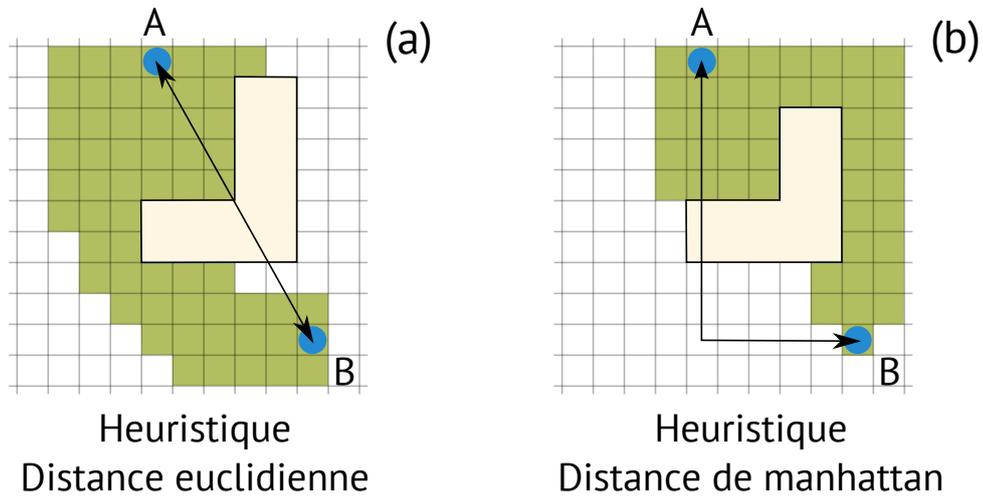


FIGURE III.12 – Illustration de l'utilisation d'une heuristique pour limiter l'espace de recherche : mouvements dans les 8 directions (a), mouvements horizontaux ou verticaux (4 directions). La zone de couleur verte représente l'espace du domaine de recherche exploré.

III.3.4 Les méta-heuristiques

Différentes approches ont été décrites, les méthodes exactes et les méthodes approchées. La non connaissance de la solution optimale écarte les approches utilisant une recherche par chemin optimal. La forte cardinalité du problème combinatoire écarte les approches par programmation dynamique et énumératives, car le nombre d'évaluations nécessaires serait alors trop important. Le but de ces travaux est cependant de proposer une approche exploratoire afin que dans un premier temps la majorité des combinaisons existantes soit identifiées. C'est seulement dans un second temps que la méthodologie développée accompagne le concepteur dans sa prise de décision à travers une représentation par coordonnées parallèles. Ainsi, afin de proposer des solutions techniques diverses sur le dimensionnement du SSC et sur l'enveloppe du bâtiment, une heuristique spécialisée n'est pas envisageable.

Une méthode approchée par méta-heuristique est alors retenue pour l'optimisation du cas d'étude (Fig. III.13). Même si les méta-heuristiques ne garantissent pas l'obtention de l'ensemble des solutions optimales au sens de Pareto, les travaux précédents dans le domaine du bâtiment ont montré (RECHT 2016; RIVALLAIN 2013)) qu'elles permettent de l'approximer de manière suffisante.

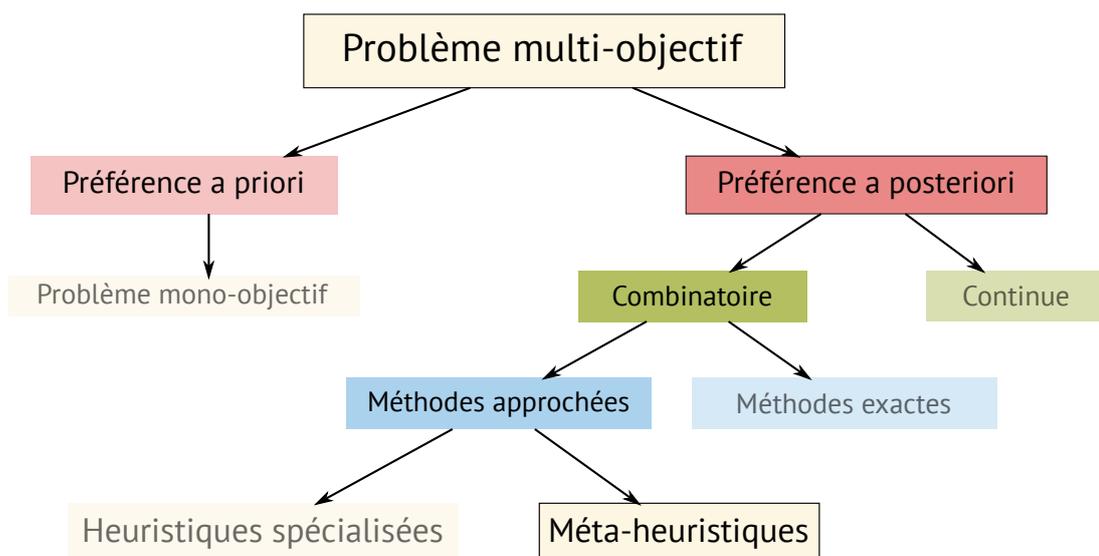


FIGURE III.13 – Transformation d'un problème multi-objectifs en optimisation multi-objectifs en utilisant une méta-heuristique.

Description

Les méta-heuristiques sont des approches générales utilisant des éléments d'apprentissage couplés à une recherche stochastique permettant d'explorer un domaine de recherche en combinant exploration (Déf. 7) et exploitation (Déf. 8). C'est un processus itératif qui tient compte de la mémoire et de l'expérience acquise à travers son évolution pour converger (Déf. 9) vers l'ensemble formé par les solutions optimales (Déf. 10). Il existe de nombreux algorithmes dans la littérature et ils peuvent tous être classés dans la branche de l'Intelligence Artificielle (IA). La notion a été définie par [John McCarthy et Marvin Lee Minsky](#)³ et ne cesse de s'améliorer dans de nombreux domaines comme le déplacement organisé en groupe (humains, oiseaux, poissons...) ou encore l'apprentissage et la réflexion. *Deep Blue* a ainsi été le premier programme informatique à battre le champion du monde d'échec de l'époque (Hsu 1999). Le jeu de Go est un autre exemple témoignant de la forte évolution de l'IA. Alors que les anciens programmes étaient loin d'être compétitifs contre le bas du classement des joueurs professionnels, *AlphaGo* (SILVER et al. 2016) a battu le champion Européen (Fan Hui) puis un des meilleurs joueurs au monde au titre de 9 dan professionnel (Lee Sedol).

Définition 7 (Exploration)

Caractérise la capacité d'une méta-heuristique à explorer le domaine formé par les variables de décision. Plus l'exploration est forte plus grand est l'espace couvert et plus grandes sont les chances de trouver les solutions optimales.

Définition 8 (Exploitation)

Caractérise la capacité d'une méta-heuristique à améliorer les solutions existantes afin d'orienter la recherche vers les solutions optimales. Plus l'exploitation est grande plus la convergence de l'algorithme est rapide.

Définition 9 (Convergence)

Dans le cas des méthodes approchées, la convergence est caractérisée par l'arrêt de l'amélioration des solutions existantes. Les méta-heuristiques étant des méthodes approchées, cette stagnation ne signifie pas que le front de Pareto réel a été atteint, seulement que les solutions ne progressent plus. Il est ainsi nécessaire de faire la distinction entre les optimums dits locaux et ceux dits globaux (Déf. 10).

Définition 10 (Optimums locaux et globaux)

*Il existe deux types d'optimum : les locaux (fort ou faible) et les globaux. Un optimum est considéré comme local fort quand il domine l'ensemble des solutions du **voisinage** et faible s'il est seulement non-dominé dans ce voisinage (plusieurs optimum locaux identiques existent). Un optimum est considéré comme global lorsqu'il domine l'ensemble des solutions existantes dans le domaine de décision. Dans le cas d'une optimisation multi-objectifs, l'ensemble des solutions du front de Pareto sont des optimums globaux formant la surface de compromis dans le respect de l'espace de décision.*

La performance d'une méta-heuristique réside dans sa capacité à faire un bon compromis entre exploitation et exploration afin d'augmenter les chances de converger vers le front de Pareto formé par les optimums globaux. En effet, améliorer l'exploration permet d'éviter de converger vers des optimums locaux mais ralentit la vitesse de convergence. À l'inverse, si l'exploitation est trop forte,

3. <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html>

la diversité des solutions va diminuer et entraîner la stagnation de l'algorithme sur des fronts dits locaux. Ce phénomène est particulièrement vrai pour des problèmes multi-modaux et ceux ayant des optimums dits trompeurs. Un problème est dit multi-modal lorsqu'il admet de nombreux optimums locaux augmentant les chances pour l'algorithme de rester bloqué. Enfin, un problème est dit trompeur lorsque la majorité de l'espace de décision favorise un front local et qu'une faible partie de l'espace permet d'atteindre le front de Pareto.

Les méthodes existantes

La plupart des méta-heuristiques s'inspirent du vivant et des différents principes le décrivant. On distingue deux grandes familles : les méta-heuristiques à population et les méta-heuristiques de voisinage. Parmi les approches par voisinage il peut être cité le recuit simulé et la recherche tabou (PAUL 2010). Ces approches cherchent à optimiser une solution grâce à une recherche locale en combinaison avec une stratégie améliorant l'exploration afin d'éviter de converger vers des optimums locaux. Parmi les approches par population, deux grandes familles se distinguent : les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes d'essaims.

Les algorithmes évolutionnaires Ces méthodes sont basées sur les mécanismes de la sélection naturelle et les algorithmes génétiques sont les méthodes les plus répandues pour les problèmes combinatoires : le plus connu étant l'algorithme NSGA II (DEB et al. 2002a) mais de nombreuses variations existent. L'algorithme SPEA2 par exemple améliore la diversité du front de Pareto grâce à une approche par clustering au prix d'une convergence plus lente (ZITZLER et al. 2001). À l'inverse, l'algorithme PESA améliore la convergence au prix de la diversité des solutions du front final. Appliquée au bâtiment, RIVALLAIN (2013) a utilisé une méthode approchée (NSGA-II) pour identifier des programmes séquentiels efficaces de réhabilitation énergétique. Il a ainsi optimisé la combinaison des modifications pour chaque phase mais aussi l'ordre dans lequel ces améliorations doivent être réalisées. Pour les différentes solutions, l'impact environnemental, le confort des occupants en période estivale, et le coût, ont été évalués. Plus récemment, RECHT (2016) a utilisé l'algorithme NSGA II pour optimiser de manière combinée, le coût, l'émission de Gaz à effet de serre, et les besoins d'une maison à énergie positive. Dans les deux cas, les résultats montrent que l'approche par méta-heuristique permet de récupérer la majorité des solutions optimales au sens de Pareto pour un nombre fortement réduit d'évaluations.

Les algorithmes d'essaim Ces méthodes sont basées sur l'expérience du vivant et plus particulièrement de l'organisation au sein d'un groupe, d'un essaim, ou d'une colonie. Parmi les plus connus, l'algorithme de colonie de fourmis a été proposé à l'origine par COLONI et al. (1992) puis étendu aux problèmes multi-objectifs et combinatoires (MICHAEL GUNTSCH 2003 ; SHEA et al. 2006). La méthode s'inspire du comportement des colonies de fourmis où chaque fourmi explore une partie du domaine de décision en laissant une trace de phéromone derrière elle. Les phéromones permettent de guider les autres fourmis vers les solutions optimales et son évaporation impose un équilibre entre exploration et exploitation afin d'éviter la stagnation. Le PSO (Particule Swarm Optimization), un autre algorithme, s'inspire du comportement des oiseaux qui volant de manière synchrone sont capables d'éviter les collisions même lors de changements brusques de direction. Cette approche a été appliquée au domaine du bâtiment pour l'optimisation multi-objectifs en tenant compte du confort des occupants, de l'impact environnemental, des besoins en énergie, et de la sécurité de l'ouvrage (ARMAND-DECKER 2015). Il existe de nombreuses autres implémentations et le lecteur intéressé pourra consulter ABOUL-ELLA HASSANIEN (2015) qui décrit les approches récentes et leurs applications.

Comment choisir ?

De nombreuses approches ont été développées mais il n'existe cependant pas de méthode permettant de sélectionner la plus adaptée : WOLPERT et MACREADY (1997) formalisent ce concept. La complexité de l'approche, et d'autres caractères subjectifs dictent alors le choix de l'algorithme mis en œuvre. Cependant, toutes les méta-heuristiques ont en commun l'introduction de mécanismes stochastiques et nécessitent le réglage de différents paramètres. Ces paramètres sont dans la majorité déterminés de manière empirique même si certaines méthodes existent afin d'automatiser ce paramétrage. LOPEZ-IBANEZ et STUTZLE (2012) ont ainsi adapté l'algorithme *F-Race* (BIRATTARI et al. 2010) aux problèmes multi-objectifs et proposent un outil permettant d'automatiser la paramétrisation de différents algorithmes de colonies de fourmis (LOPEZ-IBANEZ et STUTZLE 2012). Les auteurs montrent ainsi qu'un réglage automatique par apprentissage permet d'améliorer la performance des algorithmes par rapport à un réglage empirique. D'un algorithme à un autre, l'importance tout comme le nombre de paramètres varient fortement. Il apparaît alors important de considérer une approche dont le nombre de paramètres est réduit et dont le paramétrage est intuitif. Un autre facteur à prendre en compte est la nature du problème. Certaines formulations fortes rendent difficile leur adaptation à une optimisation dans le bâtiment. Il est ainsi nécessaire que l'approche retenue soit assez polyvalente pour formuler des problèmes mixtes combinant variables discrètes, continues, et qualitatives. Finalement le couplage entre l'outil d'optimisation et l'outil utilisé pour décrire le problème doit être le plus simple possible afin d'éviter les problèmes d'interfaçage.

Le choix d'une approche peut ainsi être guidé par les réponses aux questions suivantes :

- Quelle est la nature des variables de décision (discrètes, continues...)?
- Quelles sont les contraintes imposées par l'outil de modélisation ?
- L'algorithme nécessite-t-il la définition de nombreux paramètres ?
 - La sensibilité de l'algorithme aux paramètres est forte : Dur à paramétrer
 - Chaque paramètre a un impact identifiable en amont : Simple à paramétrer

Une fois que l'approche est sélectionnée, deux cas sont possibles :

- Une implémentation de la méthode existe :
 - Est-elle compatible avec les outils de modélisation utilisés ?
 - Permet-elle de prendre en compte la nature des variables de décision ?
- Une implémentation de la méthode n'existe pas :
 - Existe-t-il une autre approche répondant aux contraintes du problème ?

Il est possible dans les deux cas de préférer sa propre implémentation à condition que le travail nécessaire pour le couplage avec des outils existants (interface, abstraction de la nature des variables...) soit plus important que celui requis pour l'implémentation de l'algorithme.

III.4 Algorithme de Colonie d'abeilles virtuelles

Le dimensionnement d'un SSC couplé à une MEPOS est un problème mixte (paramètres discrets, continus, et qualitatifs) la formulation de l'algorithme doit être flexible. Les approches aux formulations trop strictes comme les *algorithmes de colonie de fourmis* ne sont alors pas applicables. De plus, au vu des temps de simulation importants, l'algorithme doit être robuste et converger vers le front

de Pareto sans nécessiter un paramétrage complexe. En effet, ces paramètres sont sélectionnés de manière empirique et trouver la bonne combinaison est un problème d'optimisation en lui-même. Ainsi plus le nombre de paramètres est important, plus le nombre d'itérations nécessaires pour leur détermination est important.

Contrairement aux approches les plus couramment utilisées, l'algorithme de colonie d'abeilles virtuelles (ABC, Artificial Bee Colony) requiert la définition de seulement trois paramètres, faisant de lui un candidat adapté dont la formulation est intuitive (Tab. III.1). Le premier paramètre, IT, est commun à l'ensemble des approches et représente la condition d'arrêt. Les deux autres impactent de manière prévisible les proportions d'exploration et d'exploitation. La taille de la population, (NP), permet d'augmenter l'exploration mais peut affecter négativement la convergence. Le nombre d'essais maximum $Max_{\acute{e}chec}$, permet de contrôler l'exploitation. Un nombre trop faible risque d'entraîner l'abandon prématuré d'une solution réduisant les chances de l'améliorer. À l'inverse, un nombre trop important risque de ralentir la convergence ou limiter la diversité.

TABLE III.1 – Comparaison du nombre de paramètres à déterminer de manière empirique pour différents méta-heuristiques à population (adapté de ARMAND-DECKER 2015).

Algorithmes génétiques	Colonie de fourmis	Essaim particulaire	Colonie d'abeilles virtuelles
IT nombre d'itérations	IT nombre d'itérations	IT nombre d'itérations	IT nombre d'itérations
μ nombre d'individus	m nombre de fourmis	μ nombre de particules	NP taille de la population
Type de population (vecteur ou binaire)	ρ évaporation	w coefficient d'inertie	$Max_{\acute{e}chec}$ Nombre maximal de variations infructueuses
Méthode de croisement	τ_0 valeur initiale des phéromones	c_1 coefficient cognitif	
Méthode de sélection	β influence visibilité	c_2 coefficient social	
Probabilité de croisement	α influence phéromones	Type de voisinage	
Probabilité de mutation			
λ nombre d'enfants			

L'approche sélectionnée, son implémentation doit être simple à coupler avec les outils utilisés pour la modélisation. La restriction principale étant le couplage avec le logiciel *Dymola* par l'intermédiaire de son langage de script. Afin de pouvoir simuler de manière concurrente un jeu de simulations une bibliothèque en *Python* a été développée (*DymTK*). Afin de profiter de ces outils et simplifier le couplage, seules les solutions développées en *Python* sont retenues. Les suites logiciels telles que *jMetal*⁴ ou *MOEA Framework*⁵ sont ainsi écartées.

Dans un premier temps *DEAP* (FORTIN et al. 2012) une bibliothèque *Python* a été choisie. Elle est construite de manière à permettre à l'utilisateur de se concentrer sur la logique de l'algorithme en ajoutant une couche d'abstraction sur la gestion et la création des structures nécessaires. Bien que compatible avec les différents outils utilisés, la bibliothèque ne sera pas retenue car les briques existantes sont principalement utiles pour créer un algorithme évolutionnaire. Par exemple la gestion de

4. <http://jmetal.sourceforge.net/index.html>

5. <http://moeaframework.org/index.html>

la nature des variables, les différentes marches aléatoires, ou encore les différentes phases de l'algorithme ABC doivent être re-implémentées.

L'approche retenue a ainsi été de développer une bibliothèque permettant une utilisation simple et intuitive de l'algorithme dans l'optique de la ré-utilisabilité. De plus, de nombreuses améliorations proposées dans la littérature ont ainsi été mises en place afin de construire une méthode alternative aux approches plus traditionnelles. La section suivante présente plus en détail l'histoire de l'ABC et l'évolution de son fonctionnement à travers les améliorations sélectionnées. Le but étant d'améliorer l'exploration et l'exploitation tout en limitant la quantité de paramètres à définir de manière empirique afin de simplifier son utilisation.

III.4.1 Inspiration

Comme de nombreuses méta-heuristiques, l'ABC est inspiré du comportement des êtres vivants, ici plus particulièrement, du comportement des abeilles mellifères. De nombreux travaux ont vu le jour sur le comportement de ces abeilles comme leurs méthodes de communication et le fonctionnement de la récolte. VISSCHER et SEELEY (1982) montrent que le choix de chaque abeille est guidé par l'ensemble des informations acquises par l'essaim afin de constamment ajuster les sources utilisées pour la récolte. Puis, CAMAZINE et SNEYD (1991) élaborent un modèle mathématique permettant de simuler le comportement social caractéristique des abeilles. L'idée de s'inspirer des abeilles mellifères pour l'optimisation n'est cependant introduit qu'en 2005 (KARABOGA 2005). Même si de nombreuses formulations existent (Bee Algorithm (BA), Bee Colony Optimization (BCO)...), la formulation de l'ABC reste la plus répandue et sera retenue dans ces travaux (Fig. III.14).

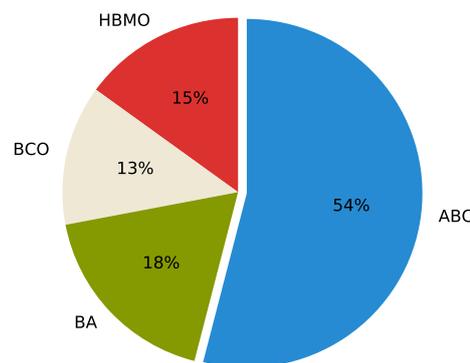


FIGURE III.14 – Pourcentage de publications en fonction de l'approche retenue pour différents algorithmes de colonies d'abeilles d'après KARABOGA et al. 2012.

III.4.2 Principe de fonctionnement

L'algorithme s'appuie sur les mécanismes d'organisation sociale des insectes (BONABEAU et al. 1999) définie par les quatre propriétés suivantes décrivant le comportement des abeilles (Fig. III.15).

Le retour positif (Positive feedback) : Chaque individu partage ses connaissances avec le reste du groupe afin de guider la recherche vers des sources de bonne qualité. Ce mécanisme fournit un indicateur d'apprentissage pouvant être utilisé pour construire de nouvelles sources.

Le retour négatif (Negative feedback) : Afin de prévenir les dangers ou d'éviter les sources de mauvaise qualité, un mécanisme est aussi nécessaire. Celui-ci permet de contrebalancer le retour positif pour équilibrer et améliorer le travail de groupe.

Fluctuation : Afin de pouvoir faire émerger de nouvelles solutions et remplacer celles qui se tarissent, il est nécessaire d'ajouter un comportement stochastique à l'exploration. Ce comportement est observé chez les abeilles avec les éclaireuses qui ne tiennent pas compte des retours positifs et/ou négatifs et cherchent par eux-même de nouvelles sources. La quantité d'éclaireuses dans une ruche est estimé à 5/10% (SEELEY 1996). Ce mécanisme est ainsi responsable de la diversité et du renouvellement en prévention de la raréfaction des ressources.

Interactions : Finalement afin de partager les retours négatifs et positifs un mécanisme de communication est nécessaire. Les abeilles transmettent les informations positives et négatives de la même manière : grâce à la danse (danse en rond et en huit). Ce mécanisme permet de transmettre de manière détaillée la qualité d'une source, sa distance par rapport à l'essaim, et des dangers potentiels rencontrés.

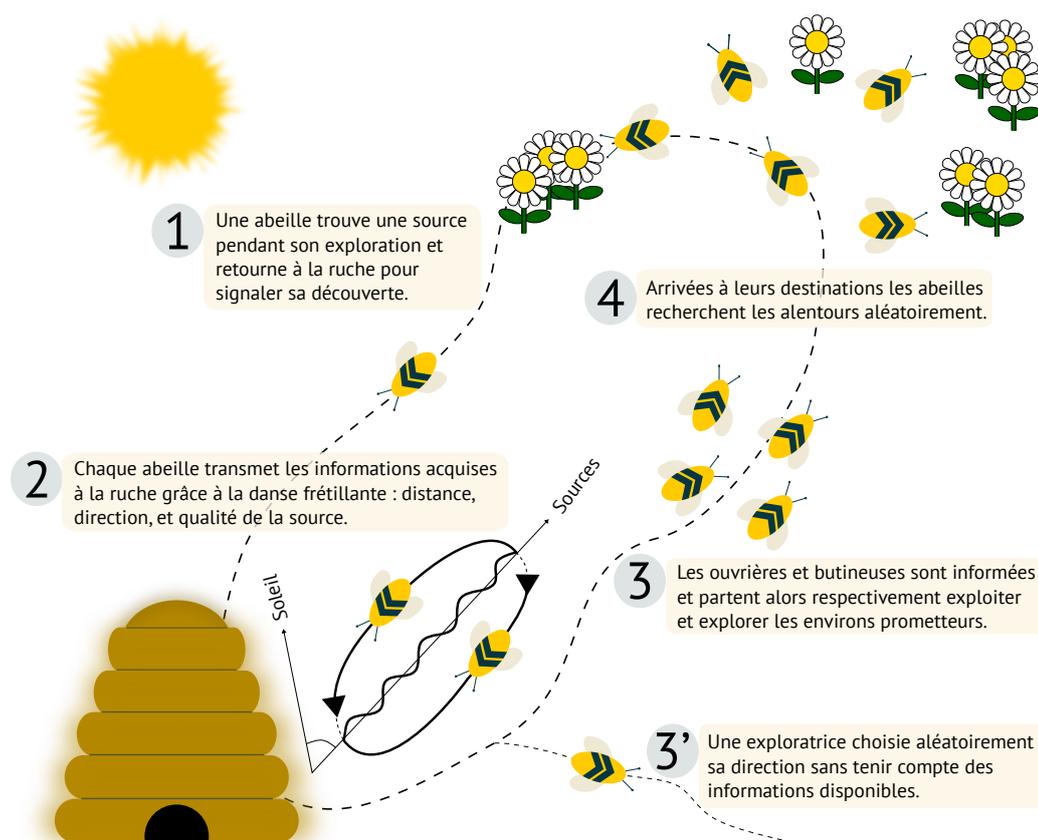


FIGURE III.15 – Organisation sociale des abeilles lors de la recherche de nourriture.

Formulation

L'algorithme ABC est une approche itérative constituée de 3 phases principales. En amont de ce processus itératif, $N = \frac{NP}{2}$ sources sont initialisées aléatoirement (III.11), avec NP la taille de la population. Chaque source i est un vecteur $\vec{x}_i (i \in \{1, 2, \dots, N\})$ de dimension D avec D le nombre de variables de décision $x_{ij} (j \in \{1, 2, \dots, D\})$.

$$x_{ij} = x_j^{min} + RandUniform(0, 1) \times (x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (III.11)$$

Chaque phase est réalisée par un type spécifique d'abeille :

- Les *butineuses* (Employed foragers) : Elles sont responsables de l'exploration. Elles ramènent

les informations recueillies à la ruche et réalisent une danse permettant aux autres individus d'identifier la qualité et la direction des sources prometteuses.

- Les *ouvrières* (Onlookers) : Elles assistent à la danse des butineuses et sélectionnent ensuite les sources prometteuses. La sélection est définie aléatoirement à partir d'une table de probabilité biaisée par la qualité des sources. Plus la source est prometteuse, plus la probabilité de la sélectionner est importante. Ces abeilles sont donc responsables de l'exploitation.
- Les *Éclaireuses* (Scouts) : Elles explorent aléatoirement l'espace de décision et ramènent les informations à la ruche. Ce mécanisme permet de diversifier la recherche et d'éviter la stagnation.

L'Alg. 1 décrit le principe de l'algorithme ABC original. À chaque itération les sources sont mises à jour par les butineuses. Ensuite une table de probabilité biaisée est créée : une probabilité est attribuée à chaque source en fonction de leur qualité. Ensuite, les ouvrières exploitent les sources sélectionnées et la position des sources est mise à jour. Finalement les sources non fructueuses sont remplacées par une nouvelle position aléatoire définie par les éclaireuses.

```

1 Initialisation des sources (population) selon (III.11);
2 tant que Critère d'arrêt non atteint faire
3   pour i ← 0 à N faire
4     Amélioration des sources par les butineuses grâce à une autre source a (III.13);
5     Attribution des probabilités à chaque source en fonction de leur qualité (III.12);
6     Amélioration des sources par les ouvrières grâce une autre source a (III.13) sélectionnée
       suivant la table de probabilité;
7     Si la qualité de la source stagne réinitialiser sa position selon (III.11);

```

Algorithme 1 : Principe de l'algorithme ABC.

$$prob_a = \frac{Qualite(\vec{x}_a)}{\sum_{i=1}^N Qualite(\vec{x}_i)} \quad (III.12a)$$

avec

$$Qualite(\vec{x}_a) = \frac{Dominance(a) + 1}{N} \quad (III.12b)$$

Où $Dominance(a)$ est le nombre de sources que la source a domine.

$$x'_{ij} = x_{ij} + RandUniform(-1, 1) \times (x_{ij} - x_{aj}) \quad (III.13)$$

x_{ij} étant la position d'une source i ($i \in \{1, 2, \dots, N\}$) pour la variable j ($j \in \{1, 2, \dots, D\}$) et x_j^{max} et x_j^{min} étant respectivement ses bornes maximales et minimales.

Le lecteur souhaitant avoir plus d'informations sur l'algorithme, son origine et/ou son fonctionnement pourra lire : ABOUL-ELLA HASSANIEN 2015; KARABOGA et al. 2012.

Extensions

À l'origine pensé pour résoudre des problèmes continus, l'algorithme a été adapté aux problèmes d'optimisation binaire (KASHAN et al. 2012), et combinatoires (KARABOGA et AKAY 2011). Cette méta-heuristique a ainsi été utilisée pour résoudre des problèmes de différents domaines, dont l'entraînement de réseaux de neurones (KARABOGA et AKAY 2007), le génie électrique/mécanique/civil (RAO et PAWAR 2009), ou encore le clustering (ZHANG et al. 2010). On retrouve aussi cet algorithme dans l'optimisation de système de chauffage (ATASHKARI et al. 2011) ou dans des problèmes sous

contraintes (KARABOGA et AKAY 2011; TSAI 2014). Malgré son jeune âge, la littérature sur les colonies d'abeilles augmente et continue de se diversifier pour mieux répondre aux différents problèmes d'optimisation (Fig. III.16).

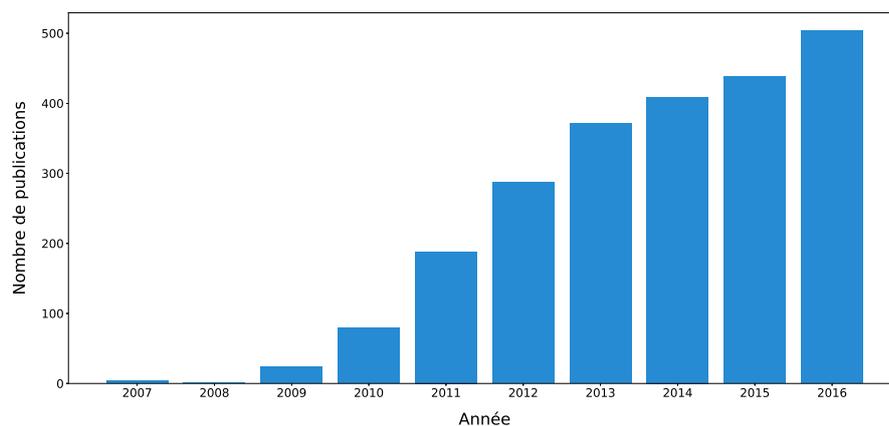


FIGURE III.16 – Évolution du nombre de publications depuis la publication de l’algorithme ABC jusqu’à aujourd’hui.

La méta-heuristique étant plus faible en exploitation qu’en exploration, de nombreuses propositions d’améliorations ont vu le jour. Certains s’inspirent des algorithmes évolutionnaires (BI et WANG 2011; ZHAO et al. 2010) et d’autres s’inspirent du PSO. ZHU et KWONG (2010) développent l’algorithme GBest Artificial Bee Colony (GABC) en ajoutant la prise en compte de l’inertie et de la meilleure solution actuelle. LI et al. (2012) ajoutent aussi la prise en compte de l’accélération et nomme l’approche : Improved Artificial Bee Colony (I-ABC). Afin d’améliorer la diversité dans la population initiale, XIANG et AN (2013) initialisent la position des sources en utilisant une séquence issue de la théorie du chaos en place d’une initialisation stochastique. Il peut aussi être cité une modification du comportement des exploratrices proposée par SHARMA et al. (2012) basée sur la distribution de Lévy.

L’algorithme a aussi été adapté afin de résoudre des problèmes multi-objectifs. AKBARI et al. (2012) proposent une approche comprenant un essaim unique et le nomment MO-ABC pour Multi-Objective Artificial Bee Colony. L’auteur utilise une archive basée sur l’ ϵ -dominance afin de maintenir la diversité et assurer la convergence vers le front de Pareto. Durant les phases des butineuses et des ouvrières seulement une variable est mise à jour en utilisant une version modifiée de l’équation (III.13) où a représente une solution de l’archive sélectionnée aléatoirement. OMKAR et al. (2011) considèrent un essaim par objectif et nomme son approche : VEABC pour Vector Evaluated Artificial Bee Colony. Une collaboration est mise en place permettant aux sources d’un essaim d’être mises à jour à partir des sources d’un autre essaim. L’approche est appliquée aux problèmes sous contraintes où l’auteur cherche à minimiser le coût de fabrication (matériaux + production) et le poids du composant tout en garantissant une résistance suffisante. ZHANG et al. (2012) développent aussi une approche basée sur plusieurs essaims mais ici, chaque essaim considère l’ensemble des objectifs. En utilisant les distances de Hamming et de Crowding, les auteurs ajoutent une coopération entre les essaims pour la sélection des sources de référence. L’auteur intègre de plus une méthode de pénalité adaptative (WOLDESENBET et al. 2007) afin de pouvoir traiter des problèmes sous contraintes.

Développé dans un premier temps pour résoudre des problèmes mono-objectif il a été adapté aux problèmes multi-objectifs. Les nombreux travaux témoignent d’un attrait grandissant pour l’approche et mettent en avant sa modularité. En effet, à travers la diversité des comportements (butineuses, exploratrices, et ouvrières) il est possible d’équilibrer l’exploration et l’exploitation; condition essentielle pour répondre de manière adaptée et flexible à des problématiques complexes. Les différents

travaux décrits dans la littérature permettent ainsi de construire un algorithme efficace.

La sous-section suivante présente les améliorations retenues dans ces travaux. Le but étant d'améliorer l'exploration et l'exploitation tout en limitant le nombre de paramètres à définir de manière empirique afin de conserver une méta-heuristique simple d'utilisation.

III.4.3 Vol de Lévy

Il a été observé chez diverses espèces comme les atèles (singes), les albatros, ou encore la famille des Tephritidae (petites mouches) un comportement respectant une marche aléatoire (Déf. 11) connu sous le nom de *Vol de Lévy* (Déf. 12). Les marches aléatoires sont souvent utilisées dans les méta-heuristiques afin de modifier le vecteur décision des solutions déjà existantes à l'aide d'un indicateur d'apprentissage. Par exemple, une loi normale permet de renforcer une solution localement alors qu'une loi uniforme permet d'explorer de manière analogue le domaine. Le lecteur pourra noter la forme caractéristique de la distribution de *Lévy* retenue dont l'expression analytique est définie uniquement pour certaines valeurs de paramètres contrairement aux autres distributions (Fig. III.17).

SHARMA et al. (2012), utilisent le vol de *Lévy* afin de réaliser une recherche locale et HAKLI et UGUZ (2013), l'utilisent pour améliorer l'exploitation durant la phase des exploratrices. Le *Vol de Lévy* est aussi utilisé dans une méta-heuristique récente : le *Cuckko search*. Inspiré du comportement parasite de la reproduction des *cuculidés*⁶, il a aussi fait l'objet d'une adaptation aux problèmes multi-critères (YANG et DEB 2013).

Définition 11 (Marche aléatoire)

Une marche aléatoire (YANG 2014) peut être définie comme une succession de pas aléatoires dont chaque état ne dépend que de l'état précédent. Si on note S_P la somme des pas aléatoires consécutifs X_w alors S_W est une marche aléatoire :

$$S_W = \sum_{w=1}^W X_w = X_1 + \dots + X_W \tag{III.14}$$

$$= S_{W-1} + X_W$$

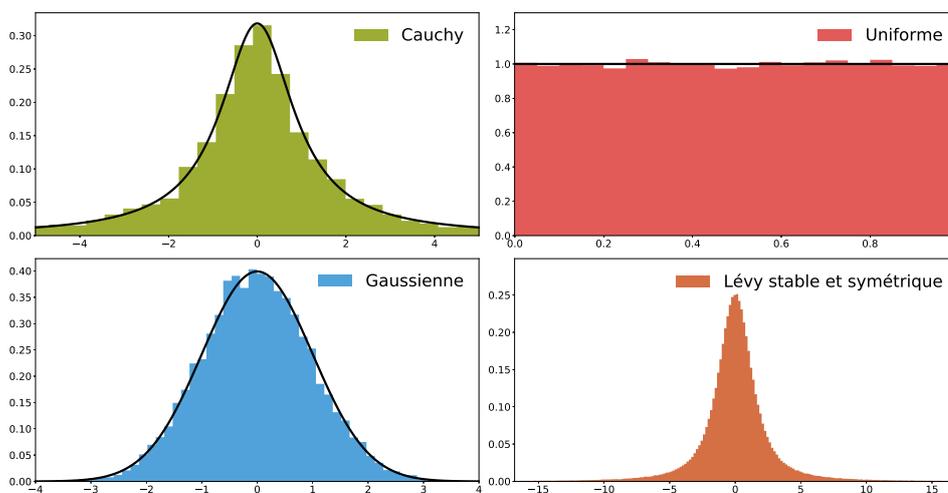


FIGURE III.17 – Densité de probabilité des lois de Cauchy, uniforme, normale, *Lévy* stable et symétrique. L'expression analytique est représentée par la courbe noire.

6. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cuculidae>

Définition 12 (Vol de Lévy)

Un vol de Lévy est une marche aléatoire dont la longueur du pas (positif ou négatif) est définie aléatoirement à partir d'une distribution de Lévy stable et symétrique couramment décrite par la transformée de Fourier suivante :

$$\mathcal{F}(k) = \exp(-\alpha|k|^\beta) \quad 0 < \beta \leq 2 \quad (\text{III.15})$$

La forme analytique étant définie par :

$$L(s) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \cos(ks) \exp(-\alpha k^\beta) dk \quad 0 < \beta \leq 2, \quad \alpha > 0 \quad (\text{III.16})$$

On peut alors définir un Vol de Lévy pour une position initiale x comme :

$$x(t+1) = x(t) + \omega \times T_L \times \Phi \quad (\text{III.17})$$

avec ω un facteur d'échelle permettant de limiter l'agressivité du pas, T_L un nombre tiré aléatoirement dans la distribution de Lévy et Φ un indicateur d'apprentissage propre à la méta-heuristique.

Sa forme analytique (III.16) est uniquement connue pour $\beta = 2$ (distribution gaussienne) et $\beta = 1$ (distribution de Cauchy) avec α un facteur d'échelle ($\alpha \in [-1, 1]$). L'algorithme de Mantegna (MANTEGNA 1994) est alors utilisé afin d'approximer cette distribution pour $0,3 < \beta < 1,99$ (III.18).

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\beta}}, \quad u \sim \mathcal{N}(0, \sigma_u^2), \quad v \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2) \quad (\text{III.18})$$

avec

$$\sigma_u = \left[\frac{\Gamma(1 + \beta) \sin(\pi \frac{\beta}{2})}{\Gamma\left[\frac{(1+\beta)}{2}\right] \beta 2^{\frac{(\beta-1)}{2}}}\right]^{1/\beta}, \quad \sigma_v = 1$$

Où Γ représente la fonction Gamma qui est l'extension analytique de la fonction factoriel pour les complexes et les réels ($\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$, $\beta \in \mathbb{N}$) et est définie par :

$$\Gamma(\beta) = \int_0^\infty t^{\beta-1} e^{-t} dt$$

Le vol de Lévy peut ainsi être assimilé à une intensification (forte probabilité de générer un petit pas) couplée à de l'exploration (faible probabilité de générer un saut important) décrite par l'effet d'île caractéristique du vol de Lévy (Fig. III.18) Il est ainsi possible d'améliorer l'exploration mais aussi de se dégager des optimums locaux ou des solutions non prometteuses. Afin d'améliorer l'exploitation et l'exploration ces travaux implémentent un vol de Lévy comme marche aléatoire durant la phase des butineuses.

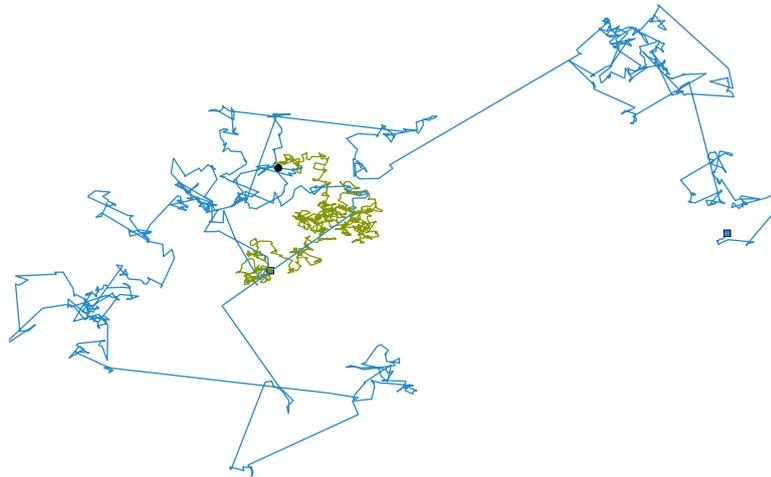


FIGURE III.18 – Mouvement brownien (en vert) et vol de Lévy (en bleu) pour 200 pas aléatoires.

III.4.4 Apprentissage par vecteur opposé

Les méthodes d'optimisation et spécifiquement les méthodes approchées sont fortement dépendantes de la population initiale. Il est ainsi nécessaire de constituer une population couvrant de manière homogène l'espace de décision. L'approche la plus répandue consiste à construire une population initiale stochastiquement à l'aide d'une distribution uniforme suivant (2). Afin d'améliorer la diversité / qualité de la population initiale sans connaissance a priori, TIZHOOSH (2005) a développé l'apprentissage par vecteur opposé (OBL pour Opposite Based Learning) (Déf. 13).

Définition 13 (OBL : Apprentissage par vecteur opposé)

Admettons une position de dimension D , $\vec{x}(x_1, x_2, \dots, x_D)$ avec x_1, x_2, \dots, x_D des valeurs bornées. Si $x_j \in [c_j, d_j]$ pour $j = 1, 2, \dots, D$ alors la position opposée est $\vec{\check{x}}(\check{x}_1, \check{x}_2, \dots, \check{x}_D)$ est définie par :

$$\check{x}_j = c_j + d_j - x_j$$

RAHNAMEYAN et al. (2008) l'adaptent pour l'algorithme Differential Evolution (DE) et montrent que la probabilité d'améliorer une solution est plus grande si on sélectionne la position opposée que si on tire aléatoirement une autre position. Dans leur implémentation, ils l'utilisent durant l'initialisation mais aussi au cours du processus d'optimisation. Les bornes (c_j et d_j) sont alors définies dynamiquement afin d'éviter de ralentir la convergence. Cette approche a aussi été appliquée avec succès dans le cas de l'algorithme ABC en association avec un opérateur de mutation (BI et WANG 2011), ou encore en coopération avec une marche aléatoire (SHARMA et al. 2012). Elle a aussi été utilisée pour résoudre des problèmes à objectifs multiples, en combinaison avec un algorithme évolutionnaire (MA et al. 2014), ou encore avec le PSO (GAO et al. 2013).

L'approche est ainsi retenue afin d'améliorer la diversité de la population initiale et sera aussi utilisée durant la phase des exploratrices afin d'augmenter la qualité de la nouvelle position. Pour chaque source, une position candidate (\vec{x}) et son opposée ($\vec{\check{x}}$) sont ainsi évaluées. Une sélection par tournoi binaire permet de retenir la meilleure des deux comme nouvelle position pour la source.

III.4.5 L' ϵ -dominance

Contrairement à une approche mono-objectif, il existe plusieurs solutions optimales dans une approche multi-objectifs. Il apparaît alors nécessaire de conserver l'évolution du front de Pareto : c'est

le rôle de l'archive (LAUMANNNS et al. 2002).

Afin de garantir la convergence, il est nécessaire d'utiliser une approche élitiste en limitant la population de l'archive aux solutions les plus performantes (ZITZLER et al. 2000). De plus, afin d'éviter de converger vers un front local, la population doit conserver une bonne diversité. L'algorithme de base du NSGA-II (DEB et al. 2002a), utilise le *Fast Non Dominated Sorting Algorithm* afin de construire son archive. Dans cette approche une sélection par rang est appliquée afin de trier les solutions en différents niveaux et la distance dite de crowding (distance moyenne entre deux solutions) est utilisée afin de maintenir la diversité. L'algorithme SPEA II améliore la diversité du front final au prix d'une convergence plus lente en utilisant une approche par clustering. Dans cette approche la taille limite de l'archive est définie par le nombre de clusters. Ces clusters sont formés en se basant sur la distance euclidienne et une seule solution est retenue. LAUMANNNS et al. (2002) proposent une autre approche, séparer l'espace des solutions en une grille dont les dimensions sont définies par le vecteur $\vec{\epsilon}$. Dans cette approche l'espace des objectifs est divisé en hypercubes, et chaque hypercube est comparé selon l' ϵ -dominance (Déf. 14). Bien que d'autres approches utilisent une grille similaire (PAES) (KNOWLES et CORNE 2000), l' ϵ -dominance n'accepte qu'une unique solution par hypercube assurant une plus grande diversité de la population. La taille de l'archive est donc fonction des ϵ choisis pour chaque objectif et est donc toujours garantie d'être finie.

Définition 14 (ϵ -dominance)

L' ϵ -dominance suppose que deux solutions sont identiques lorsqu'elles appartiennent au même hypercube dont les dimensions des arêtes sont définies par $\vec{\epsilon}_m, m \in \{1, \dots, M\}$ avec M le nombre de fonctions objectif. Dans le cas d'une maximisation il est dit que \vec{x}_a ϵ -domine \vec{x}_b si :

$$\forall m \in \{1, M\}, \quad \left| \frac{f_m(\vec{x}_a)}{\epsilon} \right| \leq \left| \frac{f_m(\vec{x}_b)}{\epsilon} \right|$$

et

$$\exists m \in \{1, M\}, \quad \left| \frac{f_m(\vec{x}_a)}{\epsilon} \right| < \left| \frac{f_m(\vec{x}_b)}{\epsilon} \right|$$

Cette relation sera notée : $\vec{x}_a <_{\epsilon} \vec{x}_b$.

Une solution peut ainsi être ou dominée, dominante, identique, ou non-dominée au sens de l' ϵ -dominance, les solutions ϵ -non-dominées formant alors le front d' ϵ -Pareto (Fig. III.19). Lors de l'ajout d'une solution à l'archive l' ϵ -dominance est dans un premier temps utilisée afin de les départager. Dans le cas où la nouvelle solution serait ϵ -identique elle est uniquement comparée avec celle déjà archivée dans le même hypercube. La distance euclidienne est alors utilisée pour les départager. La solution retenue est celle la plus proche de l'optimum de l'hypercube (coin supérieur droit dans le cas d'une maximisation). Contrairement à une sélection par dominance stricte le calcul de la distance euclidienne permet de tenir compte de l'ensemble des améliorations et est moins élitiste. Afin d'éviter l'ajout de biais, les objectifs sont normalisés dans l'espace de l'hypercube. L' ϵ -archive permet ainsi d'assurer :

- L'élitisme : seule les solutions non-dominées sont retenues
- La diversification : une unique solution par hypercube
- Une taille limite : La taille maximale est fonction de $\vec{\epsilon}$ et est finie

- Une intensification : En réduisant $\vec{\epsilon}$ on augmente la taille maximale de l'archive
- Une réduction : En augmentant $\vec{\epsilon}$ on réduit la taille maximale de l'archive

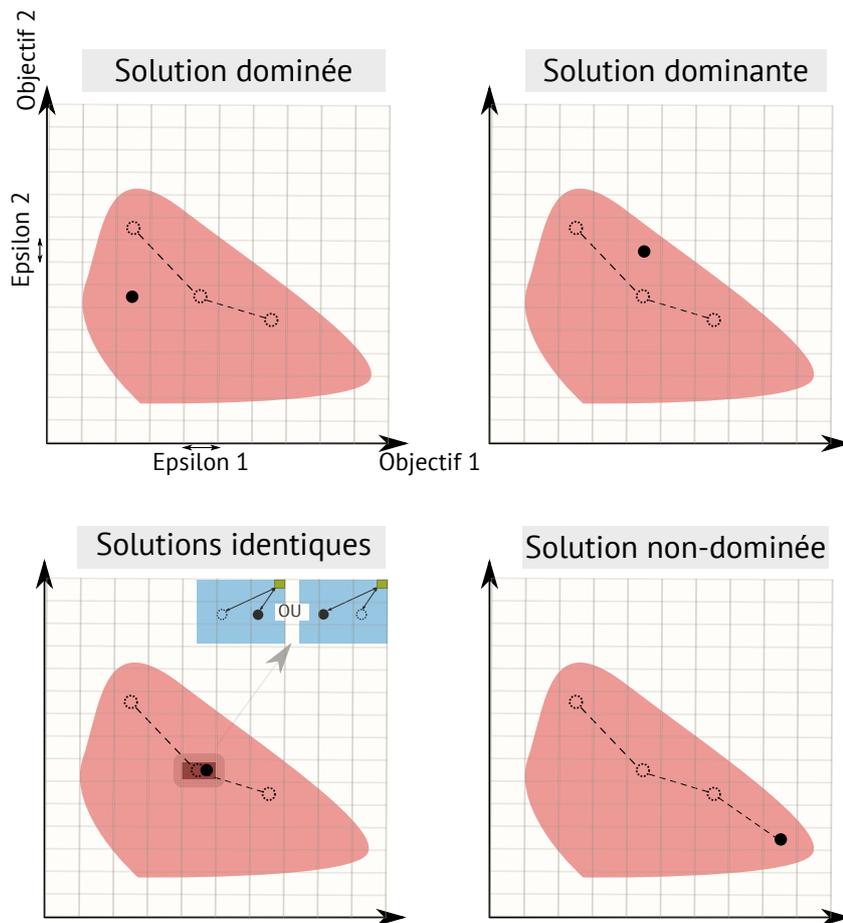


FIGURE III.19 – Principe de la mise à jour de l'archive par epsilon-dominance (maximisation assumée). Adapté de DEB et al. 2005.

L'étude réalisée par DEB et al. (2005) montre que l' ϵ -dominance permet d'obtenir une très bonne convergence et une grande diversité sur le front final. Les résultats indiquent que les approches PESA et NSGA II obtiennent une moins bonne représentation du front de Pareto que celles utilisant l' ϵ -dominance (ϵ -MOEA) ou le clustering (C-NSGA II, SPEA). Cette observation est d'autant plus vraie pour des problèmes ayant plus de deux objectifs (*DTLZ1 ... DTLZ7*). De plus les résultats mettent aussi en évidence que le NSGA II et le ϵ -MOEA convergent plus rapidement que le SPEA II. Un désavantage à cette méthode peut cependant être noté. De par sa formulation les solutions au niveau des extrêmes sur le front de Pareto sont plus difficilement atteignables.

L' ϵ -archive est donc retenue comme solution d'archivage dans ces travaux car il représente un bon compromis entre diversité et convergence.

III.4.6 Tenir compte des contraintes

Les problèmes multi-objectifs dans le domaine de l'ingénierie sont souvent dépendants de contraintes limitant l'ensemble des solutions optimales au domaine de faisabilité. L'optimisation consiste alors à améliorer les objectifs tout en respectant les contraintes spécifiques au problème (III.9).

La littérature introduit de nombreuses méthodes permettant de tenir compte des contraintes. L'approche la plus courante est d'utiliser un facteur de pénalité. Ce facteur est dit statique si il est fixe durant l'ensemble de l'optimisation, dynamique si il est adapté en fonction du nombre d'itérations, et

adaptatif si les informations acquises par la recherche aide à sa détermination (COELLO 2002). Parmi les approches existantes il peut être cité la méthode de la peine de mort. Elle consiste à appliquer une pénalité très importante aux objectifs afin de rejeter toutes les solutions sous contraintes. Certaines moins exclusives désavantagent les solutions ne respectant pas les contraintes en fonction de leur niveau de violation alors que d'autres ajustent dynamiquement la pénalité en fonction du nombre d'itérations déjà réalisées. Le problème récurrent avec ces approches réside dans l'ajout de paramètres supplémentaires qui doivent être déterminés empiriquement.

COELLO (2002) explique qu'une bonne prise en compte des contraintes ne devrait pas nécessiter le paramétrage de facteurs car ils impactent fortement la performance de la méthode. Finalement, la méthode sélectionnée ne doit pas nécessiter un nombre plus important d'évaluations car elles peuvent être coûteuses. DEB (2000) propose une méthode de sélection par tournoi respectant ces conditions dont les règles sont les suivantes :

- Une solution avec contraintes est inférieure à une solution sans contraintes
- Si les deux solutions sont sans contraintes la solution dominante est préférée
- Si les deux solutions sont sous contraintes, la solution violant le moins les contraintes est préférée

La méthode a l'avantage d'être simple à mettre en place mais est cependant très élitiste car les solutions non faisables sont toujours écartées durant la recherche.

Dans ces travaux la contrainte principale est l'obtention d'un bâtiment à énergie positive favorisant le recours à l'énergie solaire par l'intermédiaire de capteurs photovoltaïques et d'un SSC. Cette contrainte limite fortement l'espace de recherche et une approche trop stricte (qui considère toujours une solution sous contrainte comme inférieure) risque de limiter l'exploratoire. Dans ces travaux, une méthode adaptative moins élitiste est donc retenue. Adaptée aux problèmes multi-objectifs par WOLDESENBET et al. (2007), la méthode ne demande aucun paramétrage, et l'objectif modifié est calculé de la manière suivante :

- Normaliser les objectifs selon (III.19)
- Normaliser les contraintes et les agréger pour former une unique contrainte selon (III.20)
- Calculer les objectifs modifiés par agrégation des contraintes et des objectifs selon (III.21)

$$\tilde{f}_m(\vec{x}) = \begin{cases} \frac{f_m(\vec{x}) - \min(f_m(\vec{x}))}{\max(f_m(\vec{x})) - \min(f_m(\vec{x}))} & \text{(minimisation)} \\ 1 - \left[\frac{f_m(\vec{x}) - \min(f_m(\vec{x}))}{\max(f_m(\vec{x})) - \min(f_m(\vec{x}))} \right] & \text{(maximisation)} \end{cases} \quad \text{(III.19)}$$

avec $f_m(\vec{x})$ la valeur de l'objectif m , pour la position \vec{x} dans l'espace de décision.

$$v(\vec{x}) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \left(\frac{g_q(\vec{x})}{\max(g_q(\vec{x}))} \right) \quad \text{(III.20)}$$

avec Q le nombre de contraintes d'inégalités. g_q représente alors la fonction contrainte associée à la contrainte q avec $g_q \geq 0$. Dans cette représentation les contraintes d'égalité doivent être transformées en contraintes d'inégalité.

$$F_m(\vec{x}) = d_m(\vec{x}) + p_m(\vec{x}) \quad \text{(III.21)}$$

avec $d_m(\vec{x})$ calculée selon (III.22) et $p_m(\vec{x})$ selon (III.23).

$$d_m(\vec{x}) = \begin{cases} v(\vec{x}) & \text{si } r_f = 0 \\ \sqrt{v(\vec{x})^2 + \tilde{f}_m(\vec{x})^2} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

$$p_m(\vec{x}) = (1 - r_f)X(\vec{x}) + r_f Y_m(\vec{x}) \quad (\text{III.23})$$

où

$$r_f = \frac{\text{Nombre de solutions réalisables}}{\text{Taille de la population}}$$

et

$$X(\vec{x}) = \begin{cases} 0, & \text{si } r_f = 0 \\ v(\vec{x}), & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Y_m(\vec{x}) = \begin{cases} 0, & \text{si } \forall q, g_q(\vec{x}) = 0 \\ \tilde{f}_m(\vec{x}) & \end{cases}$$

L'algorithme s'adapte ainsi dynamiquement à la population et peut accepter des solutions ne respectant pas les contraintes. Plus il y a de solutions non réalisables dans la population, moins une solution ne respectant pas les contraintes a de chances d'être sélectionnée. L'approche permet d'améliorer l'exploration de l'espace de décision et ainsi de pouvoir trouver des solutions existantes même lorsque l'espace de faisabilité est faible. L'approche est donc retenue dans ces travaux afin de mettre à jour la position des sources, les solutions retenues dans l'archive doivent elles respecter l'ensemble des contraintes pour être acceptées.

III.4.7 Description de l'approche globale

Dans la section précédente, chaque élément utilisé dans l'algorithme a été détaillé et les avantages et inconvénients des approches retenues ont aussi été explicités. Dans cette section le fonctionnement global de la méthode approchée d'optimisation multi-objectifs retenue est décrit.

L'algorithme (Fig. III.20) et le détail de chaque phase sont décrits ci-après. Les sources sont initialisées (Alg. 2) suivant la méthode OBL (Déf. 13) afin d'obtenir une meilleure représentation du domaine de décision en amont de l'optimisation. Durant la phase des butineuses (Alg. 6), chaque source subit une variation en tenant compte de deux sources, une de l'essaim et une de l'archive. Durant la phase des ouvrières (Alg. 4), la qualité de chaque source (III.12) est utilisée afin de sélectionner et d'exploiter seulement les plus prometteuses. Finalement, si une source a été modifiée infructueusement plus de *MaxEchec*, alors une exploratrice réinitialise sa position de manière aléatoire (Alg. 3). Tant que la condition d'arrêt n'est pas atteinte, les phases des butineuses, des ouvrières, et des exploratrices sont répétées de manière cyclique. Au cours de la recherche les nouvelles sources sont ajoutées à l'archive et sont utilisées comme élément d'apprentissage pour les abeilles butineuses ou ouvrières. Les exploratrices, elles, n'utilisent jamais d'éléments sociaux d'apprentissage. Finalement,

une fois la condition d'arrêt atteinte l'ensemble des solutions de l'archive forme le front de Pareto.

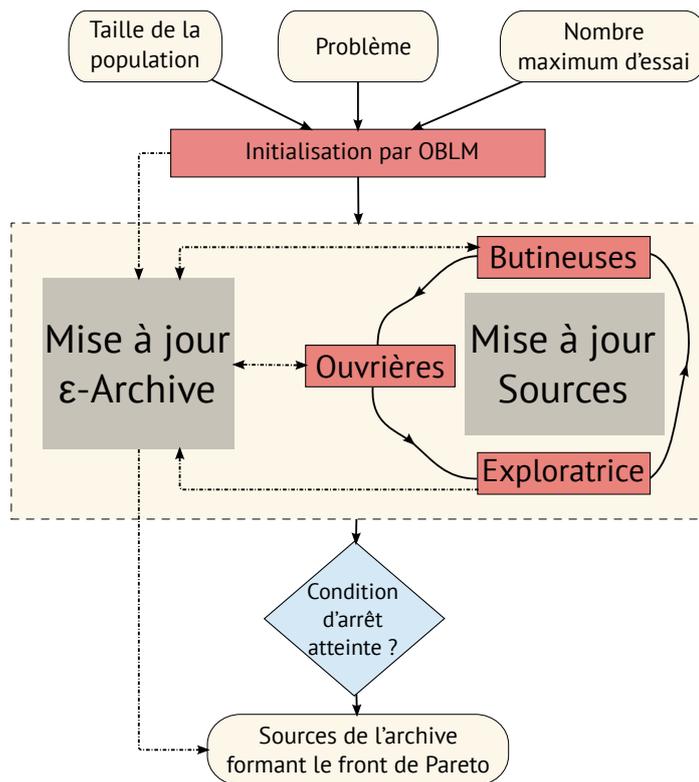


FIGURE III.20 – Description globale de l’algorithme ABC pour les problèmes multi-objectifs.

Dans l’optique de l’optimisation d’un modèle solaire développé sous *Dymola*, l’algorithme a été implémenté en *Python* afin de faciliter le couplage avec la bibliothèque *DymTK* qui comme nous l’avons vu dans le chapitre précédent permet d’automatiser la simulation concurrente de modèle *Modelica* sous *Dymola*. La bibliothèque est disponible sous le nom de *pyMayBee* et implémente :

- Une ϵ -archive et la hypercube-dominance
- La dominance au sens de Pareto
- La prise en compte des contraintes suivant la méthode de WOLDESENBET et al. (2007)
- Une interface commune permettant l’abstraction du type de variable (discrète, continue, qualitative)
- L’algorithme tel que décrit dans ces travaux
- Une suite de test unitaires et des cas théoriques validant l’approche avec et sans contraintes

L’approche retenue contrairement à la majorité des méta-heuristiques demande peu de paramètres à définir de manière empirique et est ainsi robuste. En effet seule la taille de la population NP , et le nombre d’essais maximum $MaxEchec$ sont à définir. De plus la taille de la population n’impacte pas le nombre de solutions dans l’archive car le stockage est réalisé dans une structure indépendante. Il est aussi important de noter que les deux uniques paramètres ont un comportement prévisible facilitant leur paramétrage. La taille de la population en augmentant améliore l’exploration réduisant les risques de stagner vers des optimums locaux mais réduit la vitesse de convergence (Déf. 9). Le nombre d’essais maximum lui est directement lié au nombre de variables de décision et à la taille de la population. Une valeur faible se traduit par un abandon rapide des solutions alors qu’une valeur plus grande augmente le nombre de variations évaluées pour chaque source. Ainsi on note clairement l’impact de chaque paramètre sur la performance de l’algorithme simplifiant sa paramétrisation.

```

1 Initialisation des Sources sur l'ensemble de l'espace de décision
2 pour  $i \leftarrow 0$  à  $N$  faire
3   Initialisation des variables de décision pour chaque source
4   pour  $j \leftarrow 0$  à  $J$  faire
5     (a) Initialisation de la position de la Source $_i$ , de manière aléatoire
6        $x_{ij} = x_j^{min} + RandUniform(0,1) \times (x_j^{max} - x_j^{min})$ 
7     (b) Génération de l'Abeille $_i$  dont la position est calculée suivant Définition 13
8        $\check{x}_{ij} = x_j^{min} + x_j^{max} - x_{ij}$ 
9     (c) Évaluation de la Source $_i$  et de l'Abeille $_i$ 
10    avec RandUniform un tirage aléatoire suivant une loi uniforme, et  $x_j^{min}$ ,  $x_j^{max}$ 
11    respectivement le minimum et le maximum de la variable  $j$ 
12  si Source $_i$  respecte toutes les contraintes alors
13    Archive += Source $_i$  # On ajoute la source initial à l'archive
14  si Abeille $_i$  respecte toutes les contraintes alors
15    Archive += Abeille $_i$  # On ajoute la source opposée à l'archive
16 Mise à jour des Sources d'après Algorithm 5

```

Algorithme 2 : Initialisation des sources par OBLM (Définition 13).

```

1 # Exploration par les Éclaireuses
2 pour  $i \leftarrow 0$  à  $N$  faire
3   si échec $_i > Max_{échec}$  alors
4     Génération de deux nouvelles positions suivant Algorithm 2
5 Mise à jour de la position des Sources d'après Algorithm 5

```

Algorithme 3 : Phase des éclaireuses.

```

1 # Exploitation des sources par les Ouvrières
2 # Plusieurs Ouvrières peuvent modifier la même source
3 pour Ouvrière  $\in$  Ouvrières faire
4   Sélection aléatoire d'une Source  $i$  selon la probabilité définie par l'équation (III.12)
5   Sélection aléatoire d'une source  $a$  ( $a \neq i$ ) dans l'Archive
6   (a) Génération d'une nouvelle position  $\vec{x}'_i$  à partir de la position  $\vec{x}_i$  pour l'Ouvrière
7   pour  $j \leftarrow 0$  à  $J$  faire
8     
$$x'_{ij} = \begin{cases} x_{ij} + RandUniform(-1,1) \times (x_{ij} - x_{aj}) & \text{TirageB} < \text{MR} \\ x_{ij} & \text{sinon} \end{cases}$$

9   Avec MR est la probabilité de réaliser une modification (fixée à 0,2) et TirageB un nombre
10  aléatoire entre 0 et 1
11  (b) Évaluation des objectifs pour la nouvelle position  $\vec{x}'_i$ 
12  si Ouvrière respecte toutes les contraintes alors
13    Archive += Ouvrière # Ajout de la solution trouvée par l'Ouvrière à l'archive
14 Mise à jour de la position des Sources qui ont été modifiées d'après Algorithme 5

```

Algorithme 4 : Phase des ouvrières.

```

1 Récupérer le maximum et minimum pour chaque objectif et contraintes dans l'Essaim
2 pour Abeille ∈ Abeilles faire
3   Calcul du vecteur objectif pour l'Abeille ( $\vec{F}'_i$ ) et pour sa Source  $i$  ( $\vec{F}_i$ ), respectivement aux
   positions  $\vec{x}'_i$  et  $\vec{x}_i$  selon (III.21)
4   pour  $m \leftarrow 1$  à  $M$  faire
5     
$$F'_{im} = d'_m(\vec{x}'_i) + p'_m(\vec{x}'_i)$$

     
$$F_{im} = d_m(\vec{x}_i) + p_m(\vec{x}_i)$$

6   si  $\vec{x}'_i > \vec{x}_i$  alors
7     Source $_i \leftarrow$  Abeille # Mise à jour de la Source à partir de l'Abeille
8     échec $_i \leftarrow 0$  # On réinitialise le nombre d'essais pour la Source  $i$ 
9   sinon
10    échec $_i += 1$  # On incrémente le nombre d'essais pour la Source  $i$ 
11

```

Algorithme 5 : Mise à jour des Sources par les Abeilles.

```

1 # Exploration des sources par les Butineuses
2 pour  $i \leftarrow 0$  à  $N$  faire
3   Sélection aléatoire de 2 sources :  $a$  ( $a \neq i$ ) dans l'Archive, et  $b$  ( $b \neq i$ ) dans l'Essaim
4   (a) Génération d'une nouvelle position  $\vec{x}'_i$  à partir de la position  $\vec{x}_i$  pour la Butineuse  $i$ 
5   si TirageA < Ratio alors
6     pour  $j \leftarrow 0$  à  $J$  faire
7       
$$x'_{ij} = \begin{cases} x_{ij} + 0,01 \times \text{Levy} \times (x_{ij} - x_{bj}) & \text{TirageB} < \text{MR} \\ + 0,01 \times |\text{Levy}| \times (x_{aj} - x_{ij}) & \text{sinon} \\ x_{ij} & \text{sinon} \end{cases}$$

8     Levy est nombre aléatoire dans une distribution de Lévy (Définition 12)
9   sinon
10    pour  $j \leftarrow 0$  à  $J$  faire
11      
$$x'_{ij} = \begin{cases} x_{ij} + \text{RandUniform}(-1, 1) \times (x_{ij} - x_{bj}) & \text{TirageB} < \text{MR} \\ + \text{RandUniform}(0, 1) \times (x_{aj} - x_{ij}) & \text{sinon} \\ x_{ij} & \text{sinon} \end{cases}$$

12
13    Où Ratio est la probabilité de réaliser un vol de Lévy (fixée à 0,5), et MR la probabilité de
    réaliser une modification (fixée à 0,3). TirageA et TirageB étant des nombres aléatoires
    (entre 0 et 1) tirés dans une distribution uniforme
14    (b) Évaluation des objectifs pour la nouvelle position  $\vec{x}'_i$ 
15    si Butineuse $_i$  respecte toutes les contraintes alors
16      # On ajoute la nouvelle source à l'archive
17      Archive += Butineuse $_i$ 
18 Mise à jour de la position des Sources d'après Algorithme 5

```

Algorithme 6 : Phase des butineuses.

III.4.8 Validation de la méthode

Cette section permet d'apprécier la performance de l'approche pour différents types de problèmes pouvant être rencontrés dans un problème d'optimisation.

La bibliothèque *pyMayBee* a été développée autour de tests unitaires (« Test-driven development »). Chaque élément (fonction / méthodes /...) et comportement (minimisation / maximisation /...) a ainsi été testé afin de garantir que la bibliothèque implémente correctement les éléments et comportements nécessaires. De par son approche, chaque nouvelle modification tient implicitement compte des tests précédents et garanti ainsi l'intégrité du code lors de son développement. Après l'implémentation des briques nécessaires et la construction de l'algorithme, des problèmes étalons ont été utilisés afin de valider la performance de l'approche. Bien que la réussite d'un problème étalon ne soit pas une condition suffisante pour garantir la convergence sur un problème réel, il apporte une information importante : la capacité de l'algorithme à s'adapter aux différents types de contraintes pouvant survenir.

La littérature décrit déjà les bénéfices apportée par l'utilisation du vol de Lévy, de l'OBL, de l' ϵ -dominance, ou encore de la prise en compte dynamique des contraintes. Ainsi, cette section n'a pas vocation à montrer le bénéfice apporté par les différentes améliorations proposées. Il reste cependant nécessaire de montrer que l'implémentation de l'algorithme ABC fonctionne correctement. Dans cette optique les résultats présentés dans cette section sont sélectionnés afin de couvrir les principales difficultés existantes (COLLETTE et SIARRY 2002; DEB et al. 2002b) :

- Front linéaire : *Hanne1* et *DTLZ1*
- Front convexe : *ZDT1*
- Multi-modal : *ZDT4*
- Concave + non-uniformité avec faible densité près de l'optimal : *ZDT6* et *DTLZ5*
- Discontinue : *DTLZ7*

Les résultats obtenus sont comparés aux résultats obtenus par DEB et al. (2005) pour différents algorithmes couramment utilisés à travers l'hypervolume et la distance générationnelle (Tab. III.2). Une augmentation de l'hypervolume se traduit par une meilleure convergence et couverture de l'espace des objectifs par l'ensemble des solutions. À l'inverse plus la distance générationnelle est faible, plus l'approximation obtenue par l'algorithme est proche du vrai front de Pareto : l'indicateur traduit la qualité de convergence. Comme pour les algorithmes de l'article, on considère 20 000 évaluations pour les problèmes avec deux objectifs et 30 000 évaluations pour les problèmes avec trois objectifs. Les résultats montrent que l'algorithme permet d'obtenir une bonne convergence et une bonne répartition des solutions sur le front de Pareto. Il obtient de plus un écart type très bas que ce soit sur l'hypervolume ou sur la distance générationnelle traduisant la robustesse de l'approche. Il n'est pas le plus performant en moyenne, cependant il est toujours proche de l'algorithme le plus performant contrairement aux algorithmes *PESA*, ϵ -*MOEA*, et *NSGAI* dont les résultats pour le problème *ZDT6* sont loin des valeurs obtenues par *SPEA 2* et *pyMayBee*. Les indicateurs pour les problèmes *DTLZ1* et *DTLZ7* sont aussi présentés graphiquement afin d'apprécier la convergence et l'étendue de la répartition du front (Fig. III.21). Le front du problème *DTLZ1* met clairement en évidence l'uniformité des solutions grâce à l' ϵ -archive et la convergence sur le problème *DTLZ7*, sa capacité à trouver des solutions pour des fronts discrets.

L'algorithme d'optimisation multi-objectifs décrit dans ce chapitre permet donc d'obtenir une bonne convergence et une bonne répartition pour une large variété de problèmes. Il est donc utilisé dans le chapitre suivant pour réaliser l'étude de cas.

TABLE III.2 – Comparaison de la qualité de convergence et de la qualité de répartition des solutions des fronts de Pareto obtenues à partir de différents algorithmes.

	Distance générationnelle		Hypervolume	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Hanne1 (2 objectifs)				
<i>pyMayBee</i>	$5,036 \times 10^{-2}$	$2,343 \times 10^{-3}$	13,1691	0,017 434 28
ZDT1 (2 objectifs)				
<i>PESA</i>	$5,348 \times 10^{-4}$	$1,262 \times 10^{-4}$	0,8680	$6,76 \times 10^{-4}$
<i>NSGAI</i>	$5,490 \times 10^{-4}$	$6,620 \times 10^{-5}$	0,8701	$3,85 \times 10^{-4}$
<i>SPEA2</i>	$1,006 \times 10^{-3}$	$1,206 \times 10^{-4}$	0,8708	$1,86 \times 10^{-4}$
ϵ -MOEA	$3,955 \times 10^{-4}$	$1,220 \times 10^{-5}$	0,8702	$8,25 \times 10^{-5}$
<i>pyMayBee</i>	$3,662 \times 10^{-4}$	$2,510 \times 10^{-5}$	0,8696	$2,74 \times 10^{-4}$
ZDT4 (2 objectifs)				
<i>PESA</i>	$7,302 \times 10^{-3}$	$4,700 \times 10^{-3}$	0,8566	$6,40 \times 10^{-3}$
<i>NSGAI</i>	$6,390 \times 10^{-3}$	$4,300 \times 10^{-3}$	0,8613	$7,10 \times 10^{-3}$
<i>SPEA2</i>	$7,693 \times 10^{-3}$	$4,300 \times 10^{-3}$	0,8609	$5,36 \times 10^{-3}$
ϵ -MOEA	$2,591 \times 10^{-3}$	$6,000 \times 10^{-4}$	0,8509	$1,54 \times 10^{-2}$
<i>pyMayBee</i>	$3,408 \times 10^{-3}$	$2,205 \times 10^{-4}$	0,8580	$4,59 \times 10^{-3}$
ZDT6 (2 objectifs)				
<i>PESA</i>	$6,416 \times 10^{-2}$	$7,300 \times 10^{-3}$	0,4145	$9,90 \times 10^{-3}$
<i>NSGAI</i>	$7,896 \times 10^{-2}$	$6,700 \times 10^{-3}$	0,3959	$8,94 \times 10^{-3}$
<i>SPEA2</i>	$5,736 \times 10^{-3}$	$9,000 \times 10^{-4}$	0,4968	$1,17 \times 10^{-3}$
ϵ -MOEA	$6,793 \times 10^{-2}$	$1,180 \times 10^{-2}$	0,4112	$1,57 \times 10^{-2}$
<i>pyMayBee</i>	$1,770 \times 10^{-2}$	$2,518 \times 10^{-4}$	0,4957	$5,91 \times 10^{-5}$
DTLZ1 (3 objectifs)				
<i>PESA</i>	$3,600 \times 10^{-3}$	$2,900 \times 10^{-3}$	0,2825	$3,32 \times 10^{-3}$
<i>NSGAI</i>	$3,510 \times 10^{-3}$	$6,700 \times 10^{-4}$	0,3132	$5,89 \times 10^{-4}$
<i>SPEA2</i>	$3,330 \times 10^{-3}$	$3,541 \times 10^{-2}$	0,3160	$6,98 \times 10^{-4}$
ϵ -MOEA	$3,290 \times 10^{-3}$	$9,200 \times 10^{-4}$	0,3009	$1,50 \times 10^{-3}$
<i>pyMayBee</i>	$4,700 \times 10^{-3}$	$2,464 \times 10^{-3}$	0,3006	$1,03 \times 10^{-3}$
DTLZ5 (3 objectifs)				
<i>PESA</i>	$9,463 \times 10^{-4}$	$1,143 \times 10^{-4}$		
<i>NSGAI</i>	$2,083 \times 10^{-3}$	$1,198 \times 10^{-4}$		
<i>SPEA2</i>	$1,978 \times 10^{-3}$	$1,644 \times 10^{-4}$		
ϵ -MOEA	$9,536 \times 10^{-4}$	$4,892 \times 10^{-5}$		
<i>pyMayBee</i>	$1,598 \times 10^{-3}$	$4,741 \times 10^{-5}$	0,4292	$9,57 \times 10^{-6}$
DTL7 (3 objectifs)				
<i>pyMayBee</i>	$1,990 \times 10^{-2}$	$6,880 \times 10^{-4}$	1,2346	$9,89 \times 10^{-3}$

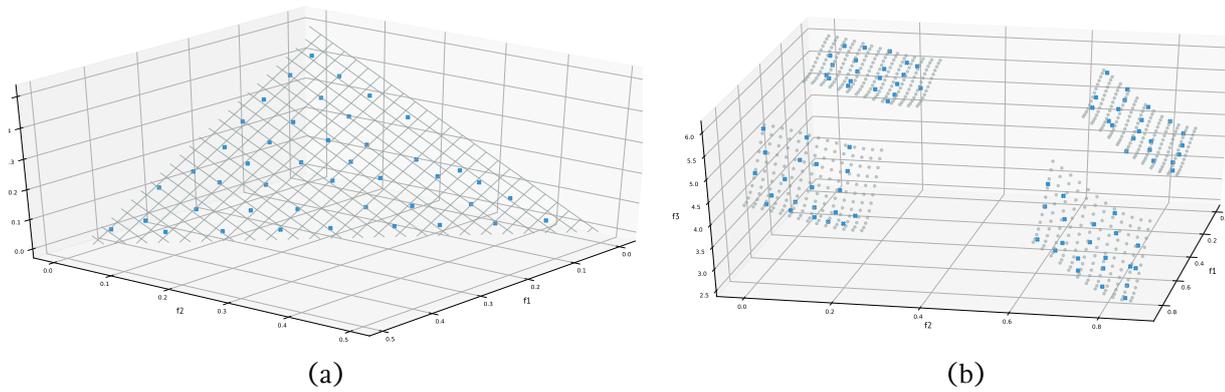


FIGURE III.21 – Comparaison entre le front de *Pareto* obtenu grâce à la bibliothèque *pyMayBee* et le vrai front de *Pareto* pour les problèmes *DTLZ1* (a) et *DTLZ7* (b).

III.5 Bilan

Au cours de ce chapitre une méthodologie d'aide à la décision permettant d'accompagner les concepteurs pour le dimensionnement d'un SSC couplé à une MEPOS a été développée. La complexité du modèle est limitée grâce à une analyse de sensibilité globale puis le temps d'évaluation du modèle est réduit en utilisant des méta-modèles. Bien que nécessaire dans ce cas précis, il reste préférable de conserver le modèle original dans le cas où il peut être évalué dans un temps raisonnable afin d'éviter d'introduire une erreur d'approximation. Pour l'aide à la décision, une approche a posteriori par coordonnées parallèles est retenue afin de ne pas introduire de préférences en amont et permettre d'explorer de nouvelles combinaisons. Cette approche nécessite l'obtention préalable d'un ensemble de solutions non-dominées et le choix d'une méthode d'optimisation multi-objectifs est donc nécessaire. Le problème étant fortement combinatoire, une méta-heuristique s'est imposé comme le choix le plus adapté. Afin de proposer une approche à la fois simple, intuitive et performante, un algorithme de colonie d'abeilles virtuelles (ABC) a été adaptée aux problèmes multi-objectifs. Ce choix a été retenu principalement car l'approche ne nécessite le paramétrage que de trois paramètres dont l'impact est connu a priori. L'approche a ensuite été renforcée par l'ajout d'une archive garantissant une bonne diversité de la population, et d'un vol de Lévy pour éviter la stagnation et améliorer l'exploratoire. De plus, durant l'initialisation, le choix a été fait de retenir l'OBLM (Déf. 13) afin d'offrir une meilleure répartition des solutions. Finalement, afin d'améliorer l'exploration et l'exploitation de l'espace de faisabilité, les contraintes sont prises en compte dynamiquement. Contrairement à une approche statique et stricte plus classique, des solutions non faisables peuvent être conservées apportant ainsi de nouvelles connaissances sur le problème. Il est ensuite possible par apprentissage, d'obtenir de nouvelles solutions optimales même dans un domaine fortement contraint.

La Fig. III.22 récapitule l'ensemble des outils utilisés pour la mise en place de la méthodologie. Comme pour l'étude paramétrique, les bibliothèques *Buildingspy* et *DymTK* sont utilisées afin de pouvoir automatiser la simulation en parallèle des modèles à partir du langage *Python*. *DyMat* a permis quant à elle de lire les résultats qui sont ensuite traités grâce aux bibliothèques *Pandas* et *Numpy*. Afin de réaliser l'échantillon pour le criblage de *Morris*, la bibliothèque *Salib* est retenue. Pour la construction d'un échantillon uniformément réparti par méthode de Quasi-Monte-Carlo et la création des méta-modèles, la bibliothèque *OpenTurns* est utilisée. L'optimisation est réalisée par une méta-heuristique et implémentée dans la bibliothèque *pyMayBee*. Finalement l'aide à la décision est réalisée par une méthode de coordonnées parallèles grâce au logiciel *XDAT*. La mise en place de cette méthodologie est illustrée dans le dernier chapitre à travers l'étude de la performance du SSC sur Bordeaux et Strasbourg.

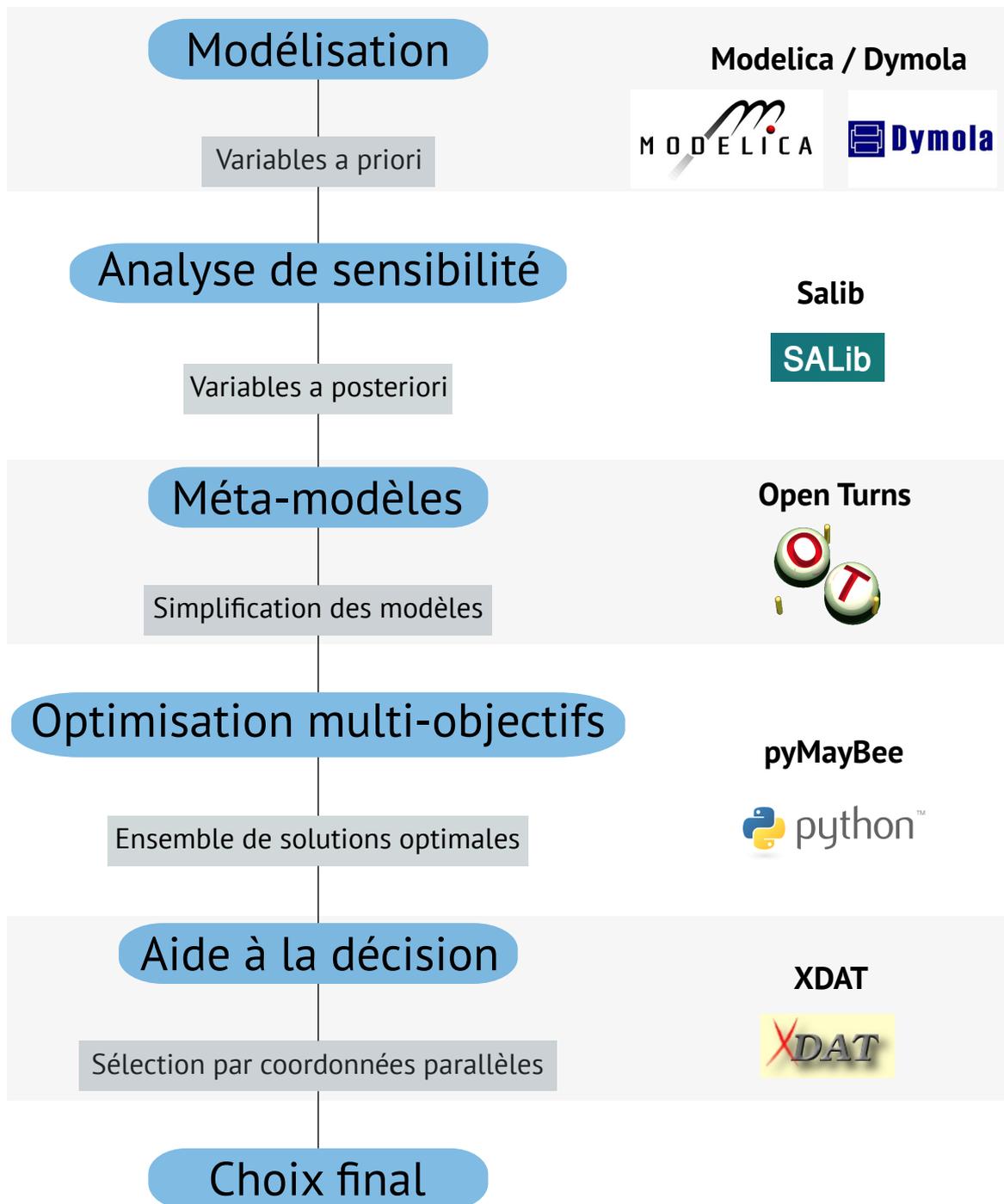


FIGURE III.22 – Outils utilisés pour la mise en place de la méthodologie d'aide à la décision.

CHAPITRE IV

OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS D'UN SSC COUPLÉ À UNE MEPOS

Dans ce chapitre, la méthodologie développée dans le chapitre III est appliquée à travers l'étude combinée du SSC et d'une maison à énergie positive afin de trouver un ensemble de solutions optimales pour deux climats différents. Ces solutions permettent de caractériser le potentiel du SSC mais aussi d'étudier les interactions existantes entre enveloppe du bâtiment et le SSC. Dans un premier temps, les hypothèses, les paramètres a priori, les contraintes, et objectifs retenus sont explicités. Dans un second temps la combinatoire du problème est limitée grâce à la méthode de *Morris*, puis le temps nécessaire pour l'évaluation d'une solution réduite, grâce à l'utilisation de méta-modèles. Suit une description détaillée des résultats obtenus par l'optimisation multi-objectifs à travers l'analyse du comportement du méta-heuristique et d'une étude détaillée de l'ensemble des solutions non-dominées. Finalement le processus d'aide à la décision est illustré.

IV.1 Description de l'étude de cas

L'optimisation multi-objectifs est réalisée à la fois sur l'enveloppe, le SSC, et sur l'algorithme de contrôle. À travers cette section, les hypothèses et paramètres a priori sont explicités, puis, les contraintes et objectifs retenus sont discutés.

IV.1.1 Hypothèses

L'objectif de ces travaux est de déterminer les configurations permettant de garantir l'obtention d'une MEPOS dont les besoins sont majoritairement couverts par l'énergie solaire. Le terme MEPOS considère ici quatre usages, la consommation propre à la climatisation n'est pas discutée :

- Le chauffage
- La production d'ECS
- L'éclairage
- Les équipements électro-domestiques

L'étude de cas est réalisée sur le bâtiment décrit dans le chapitre II et les scénarios de charges internes (équipements, éclairage, et occupants) sont issus de la simulation de référence (II.2.2). De même, le scénario de référence est retenu pour la consigne de chauffage (19-18-16 °C) comme pour la ventilation (90-20 m³/h). Pour le puisage en ECS, le profil **Réaliste** est retenu tout en tenant compte des variations hebdomadaires et mensuelles (II.3.2). En effet, comme il a été montré, il est important de tenir compte de la variation du profil de puisage au cours de l'année afin de ne pas sur-estimer la performance du SSC.

L'optimisation est réalisée simultanément sur Bordeaux et Strasbourg. Bordeaux profite d'un climat doux et d'un ensoleillement important. Strasbourg est caractérisé par un climat rude et un ensoleillement limité durant la période de chauffage bien qu'élevé durant la période estivale (Fig. IV.1). Ce comportement est particulièrement mis en évidence lorsque uniquement l'irradiation directe est comparée (droite). Enfin, l'inclinaison des capteurs est définie suivant la pente de la toiture du bâtiment. Pour Bordeaux la pente du bâtiment existant est de 33 % soit 18,9°. Pour Strasbourg, il est retenu une pente de 54° typique d'une architecture alsacienne.

Répartition de la toiture

Afin de pouvoir couvrir les consommations électriques, éclairage ($Conso_{\text{éclairage}}$) et électro-domestique ($Conso_{\text{électroménager}}$), une production photovoltaïque ($Prod_{\text{PV}}$) est retenue. La toiture doit donc être partagée entre d'une part les capteurs thermiques, et d'autre part les capteurs photovoltaïques (PV). D'après la littérature et les résultats de l'étude paramétrique l'orientation est pour le SSC un des facteurs les plus importants. Le choix est donc fait de favoriser en priorité les capteurs solaires thermiques sur le pan sud. Afin d'être le plus représentatif possible la géométrie de la toiture et des capteurs est prise en compte. En effet la maison comporte une toiture quatre pans, chaque pan est donc triangulaire ; par contre les capteurs sont eux rectangulaires. Il apparaît donc clairement que la surface de toiture réellement disponible ne peut pas être approximée par sa surface totale. De plus, chaque capteur admet une surface totale supérieure à sa surface d'entrée, les proportions variant fortement en fonction du capteur considéré. Ainsi, afin d'estimer la surface réellement disponible, un algorithme de calepinage a été développé (annexe E). À partir des dimensions du capteur (largeur et longueur de la surface totale), l'algorithme identifie le nombre maximal pouvant loger sur chaque pan de toiture sans superpositions et sans rotations. Ainsi la surface de capteurs photovoltaïques ($Surf_{\text{PV}}$) est

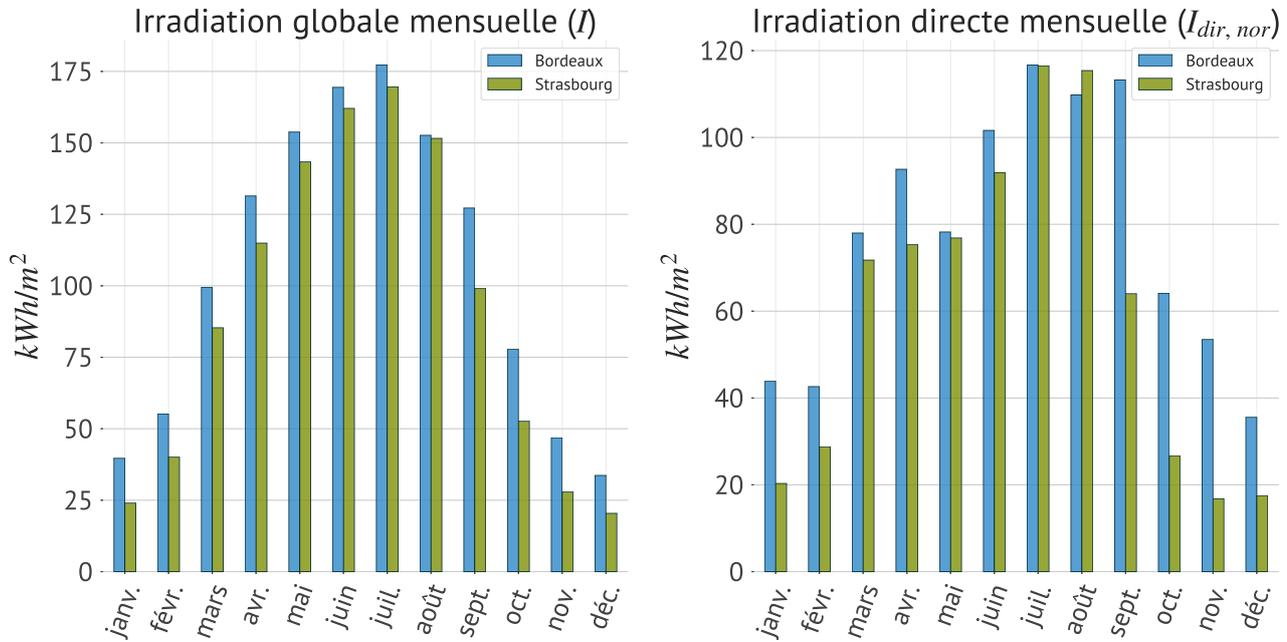


FIGURE IV.1 – Évolution mensuelle du potentiel solaire sur Bordeaux et Strasbourg avec l'irradiation globale à gauche (I) et la l'enseleillement direct à droite ($I_{dir, nor}$)

définie suivant (IV.1) en tenant compte de leur géométrie propre.

$$\begin{aligned}
 Surf_{PV}^{fsud} &= \max \left[0, \min \left(Surf_{PV}^{ftot}, Surf_{PV}^{capteur} \times \left[\frac{Surf_{dispo}^{fsud} - Surf_{TH}^{ftot}}{Surf_{PV}^{capteur}} \right] \right) \right] \\
 Surf_{PV}^{fouest} &= \max \left[0, \min \left(Surf_{dispo}^{fouest}, (Surf_{PV}^{ftot} - Surf_{PV}^{fsud}) \right) \right] \\
 Surf_{PV}^{fest} &= \max \left[0, \min \left(Surf_{dispo}^{fest}, (Surf_{PV}^{ftot} - Surf_{PV}^{fsud} - Surf_{PV}^{fouest}) \right) \right]
 \end{aligned} \tag{IV.1}$$

Avec $Surf_{PV}^{ftot}$ la surface totale de capteur PV installée, $Surf_{PV}^{capteur}$ la surface extérieure de chaque capteur PV, $Surf_{dispo}$ la surface totale disponible sur le pan de toiture considéré, et $Surf_{TH}^{ftot}$ la surface installée de capteurs solaires thermiques. Sur le pan sud, il est admis que la $Surf_{dispo}$ est calculée en fonction de la géométrie des capteurs solaires thermiques. Les capteurs thermiques étant prioritaires sur ce pan de toiture, la surface disponible pour les capteurs PV est définie par $Surf_{dispo} - Surf_{TH}^{ftot}$. Sur les autres pans où il n'y a pas de capteurs thermiques, la $Surf_{dispo}$ est définie en fonction de la géométrie (largeur et hauteur) des capteurs PV. En effet, les capteurs solaires thermiques et photovoltaïques n'ont pas les mêmes dimensions. Dans tous les cas, si un capteur ne loge pas complètement sur le pan de toiture, il est ajouté au pan suivant. Afin de favoriser au maximum la production solaire les capteurs sont en priorité mis sur le pan sud, puis ouest, puis est.

Conditions limites

Comme pour l'étude paramétrique le coût important d'une simulation impose de simuler sur une **période s'étendant du 1^{er} octobre au 30 avril**. Le SSC couvre en effet les besoins sur le reste de l'année comme explicité dans le chapitre II.

La production d'énergie par les capteurs photovoltaïques est elle pré-calculée pour les différentes combinaisons existantes. Les capteurs solaires thermiques étant prioritaires sur le pan sud, la surface de capteurs PV n'influence pas la performance du SSC. Aussi, les charges internes propres aux occupants sont fixes et suivent un scénario prédéfini. Ainsi la production PV et les charges internes sont évaluées sur **l'année complète** en amont des simulations du SSC.

En couplant les résultats des deux simulations, la consommation totale sur les quatre usages est considérée. Le SSC couvrant en totalité les besoins sur la période non simulée, la consommation de l'appoint est équivalente à la consommation des pompes. Il est donc possible d'approximer la $Conso_{app}$ annuelle par la consommation de l'appoint et des pompes sur la période simulée. La consommation totale est alors obtenu par (IV.2). Il est important de noter que la $Conso_{app}$ est calculée à chaque pas de temps. Elle tient donc compte implicitement de l'adéquation entre besoins (chauffage et ECS) et de la production solaire thermique ($Prod_{sol}^{valorisée}$). À l'inverse, la $Prod_{PV}$ est elle pré-calculée et ne tient donc pas compte de l'adéquation avec les besoins (électroménager et éclairage).

$$Conso_{tot} = Conso_{app} + Conso_{usages} - Prod_{PV} \quad (IV.2)$$

$$= Conso_{app} + Conso_{\text{électroménager}} + Conso_{\text{éclairage}} - Prod_{PV} \quad (IV.3)$$

$$(IV.4)$$

Définition des contraintes

Afin de pouvoir proposer un ensemble d'alternatives, la maison est considérée à énergie positive si le bilan charge / production (I.3.3) est proche de zéro : $|Conso_{tot}| \leq 8$ (kWh_{ep}/m²). Pour le solaire thermique, la production est en adéquation avec la demande. Pour le photovoltaïque cependant le bilan est uniquement réalisé sur une base mensuelle. Il est en effet considéré que la maison est raccordée au réseau électrique et que le surplus de production photovoltaïque est envoyé vers le réseau. Ainsi les solutions produisant trop d'énergie comme celles produisant trop peu d'énergie seront écartées.

IV.1.2 Définition des paramètres a priori

Comme décrit dans le chapitre précédent, une analyse de sensibilité est nécessaire afin de réduire la cardinalité du problème et mieux guider l'exploration durant l'optimisation. Couvrant à la fois les caractéristiques de l'enveloppe et du SSC, l'ensemble des paramètres retenus a priori est disponible dans le Tab. IV.1. La description des facteurs est réalisée ci-après à travers trois sous-parties. Dans un premier temps les critères propres à l'algorithme sont explicités, puis les contraintes imposées par les variables qualitatives. Enfin les autres paramètres sont présentés.

Logique de contrôle

Au cours de l'étude paramétrique, ΔT_{sol} a été évalué comme impactant et est donc retenu lors de l'application de la méthodologie d'aide à la décision. Dans l'optique d'une valorisation maximale de l'énergie solaire pour le chauffage, il est aussi investigué trois variations algorithmiques supplémentaires. Le fonctionnement de base de l'algorithme admet une priorité sur la production d'ECS car les travaux de la littérature ont montré que l'énergie était mieux valorisée de cette manière. Ainsi, actuellement, la température au niveau de l'échangeur solaire (T3) doit être supérieure à 30° avant de pouvoir charger le ballon de stockage grâce à l'énergie solaire. Le choix de cette borne ($T3_{min}$) est arbitraire et l'impact de sa variation est donc investigué. L'activation du chauffage solaire ($Solaire_{direct}$ ou $Solaire_{indirect}$) est aussi contrôlée par une borne fixe (Fig. II.12). Dans le cas du $Solaire_{direct}$, la température en sortie des capteurs (T1) doit être supérieure ou égale à 40° et à la température de l'eau en sortie de l'échangeur eau/air (T7). Dans le cas du $Solaire_{indirect}$, la température du ballon de stockage (T5) doit être supérieure à 40°. Afin de chercher à valoriser au maximum l'énergie solaire pour le chauffage, il est proposé non pas une borne fixe mais un différentiel de température minimal. Dans les deux modes de chauffage, la consigne d'activation s'adapte ainsi au rapport entre la production

TABLE IV.1 – Liste des paramètres a priori utilisés pour l'analyse de sensibilité.

	Borne min	Borne max	Remarques	Unité
SSC				
Nombre capteurs TH	2	5 ou 7*	4,6 m ² à 11,6 m ² ou 16,2 m ²	-
Type de capteurs TH	-	-	Voir Tab. IV.2	-
Ech_{sol}^{pos}	0,8	1,3	Position relative à la hauteur du ballon	-
Volume ballon tampon	100	500	Géométrie adaptée proportionnellement	l
Volume ballon ECS	100	500		
$Isolant_{ballon,ep}$ tampon	0,055	0,12	Résistance dépendante du volume du ballon	m
$Isolant_{ballon,ep}$ ECS	0,055	0,12		
$Isolant_{réseau,ep}$	0,013	0,04	Résistance dépendante du nombre de capteurs	m
ΔT_{sol}	5	20	-	
$\Delta T_{min_{capteur}}$	0	30	-	°
$\Delta T_{min_{tampon}}$	0	30	-	
T_{3min}	15	40	-	
Enveloppe du bâtiment				
Type de vitrage	-	-	Voir Tab. IV.3	-
R murs	4	7	-	(m ² .K)/W
R plafond	6	10	-	
R plancher	6	10	-	
Surface vitrée est	4,3	6,46	Surface totale du mur 26,4 m ²	m ²
Surface vitrée nord	0,46	0,684		
Surface vitrée sud	5,42	8,13		
Surface vitrée ouest	2,6	3,89		
Production d'électricité				
Nombre de capteurs PV	8	24	13,1 m ² à 39,4 m ²	-

* cinq pour Bordeaux et sept pour Strasbourg.

et la demande. Il est alors introduit deux nouvelles variables : $\Delta min_{capteur}$ et Δmin_{tampon} . Le chauffage peut ainsi être en *Solaire direct* lorsque, la différence de température entre la sortie des capteurs (T1) et l'air après le caisson de mélange T_{air}^{mix} est plus importante que $\Delta min_{capteur}$. De même, le chauffage peut être en *Solaire indirect*, lorsque la différence de température entre le haut du ballon de stockage et T_{air}^{mix} est supérieure à Δmin_{tampon} . Afin d'éviter des instabilités, il est ajouté un hystérésis de 5° en plus du différentiel de référence.

Variables qualitatives

Le choix a été fait d'introduire deux capteurs plans et deux capteurs sous-vide avec des caractéristiques optiques et thermiques différentes. La recherche a été faite à travers deux bases de données (*Sun&Wind Energy*¹ et *ICC-SRCC*²) et seuls des capteurs récents sont considérés. Les capteurs ont tous une **surface totale** similaire afin de pouvoir évaluer aisément leurs performances en fonction du

1. <http://www.sunwindenergy.com>

2. <http://www.solar-rating.org/>

nombre installé. Leurs caractéristiques sont décrites suivant la surface considérée dans leur certification « Solar Keymark », indiquée par un * (Tab. IV.2). Les capteurs retenus ont ainsi dans la mesure du possible une géométrie similaire, mais des différences sur les caractéristiques de performance. Bien que la surface totale soit similaire, la largeur et la hauteur de chaque capteur varient, et l'algorithme de calepinage est utilisé pour chaque variation afin d'évaluer le nombre maximal de capteurs pouvant loger sur chaque pan de toiture. Malgré les différences géométriques (capteur de chez Ritter), le même nombre de capteurs peuvent loger sur le pan sud, même sur Bordeaux où la surface disponible est réduite. Le calcul de la répartition des capteurs PV est donc simplifié. Finalement, comme pour le capteur solaire thermique *IDMK 25-AL* utilisé dans l'étude paramétrique, une régression linéaire est réalisée afin d'identifier les modificateurs d'IAM : b_0 et b_1 (Fig. IV.2). Il peut être noté que les capteurs sous-vide (*CPC 14 Star*, *SKY PRO 12 CPC58*) sont beaucoup moins sensibles à la variation de l'angle d'incidence expliquant que leurs performances soient constantes sur la journée comme montré dans le premier chapitre (I.15).

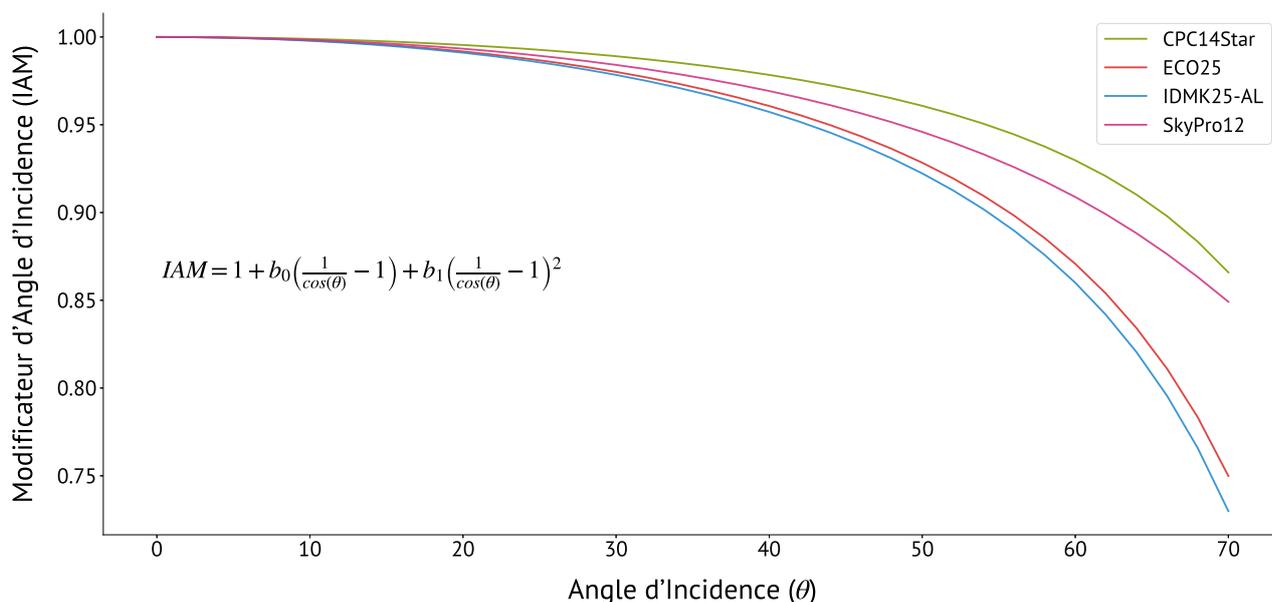


FIGURE IV.2 – Évolution de l'IAM en fonction de l'angle d'incidence pour les quatre capteurs considérés.

Concernant le type de vitrage, trois variantes sont proposées dont le détail est disponible dans le Tab. IV.3. Les caractéristiques des vitrages sont ici présentées avec les coefficients caractéristiques mais les vitrages sont implémentés de manière détaillée II.2.1. Le type de vitrage est appliqué uniquement pour les parois verticales, la fenêtre de toit n'est pas modifiée.

Autres paramètres

Les bornes inférieures et supérieures retenues pour les isolants représentent respectivement les valeurs typiques observées pour des bâtiments du niveau RT 2012 et des bâtiments à énergie positive notamment à travers le projet français COMEPOS. La plage de variation pour les surfaces vitrées a été fixée arbitrairement à plus ou moins 20 % de leur valeur d'origine et les proportions de cadre sont ajustées en fonction de la nouvelle surface (les caractéristiques du cadre et des ponts thermiques restent constantes). Le nombre minimal de PV a été défini à huit afin de couvrir 80 % (≈ 2408 kWh) de la consommation des équipements internes (≈ 3082 kWh) et éviter l'évaluation de solutions qui ne pourront jamais obtenir un bilan positif. Pour les capteurs solaires thermiques, il est considéré au minimum deux capteurs et respectivement cinq et sept pour Bordeaux et Strasbourg. Une distinction est faite entre les deux climats au regard des résultats obtenus durant l'étude paramétrique.

TABLE IV.2 – Caractéristiques des capteurs solaires thermiques sélectionnés. La présence d'un astérisque (*) indique la surface qui a été utilisée pour déterminer les coefficients de corrélations.

	IDMK 25-AL	CPC 14 Star	SKY PRO 12 CPC 58	Energy + ECO 25	Unité
Fabricant	Sonnenkraft	Ritter	Kloben	Dima	-
Type	Plan vitrée	Sous-vide	Sous-vide	Plan vitrée	-
Surface totale	2,52	2,62	2,59*	2,53	m ²
Surface d'entrée	2,33*	2,33*	2,28	2,31*	m ²
Longueur totale	2,061	1,622	1,927	2,008	m
Largeur totale	1,225	1,616	1,342	1,258	m
Poids à vide	49	41,2	51	34	kg
Contenance	1,7	2,31	1,76	1,9	l
η_0	76,5	0,644	64,1	74,0	%
a_1	3,951	0,749	0,935	5,116	W/(m ² .K)
a_2	0,011	0,005	0,004	0,023	W/(m ² .K ²)
b_0	-0,1396	-0,0709	-0,1050	-0,1284	-
b_1	-0,0004	0,0006	0,0114	-0,0008	-
$K_{\theta,dif}$	93,0	93,0	97,2	93,0	%
Fiche technique	Fig. D.5	Fig. D.7	Fig. D.4	Fig. D.6	-

TABLE IV.3 – Descriptif des caractéristiques (suivant NF EN 410 2011 et NF EN 673 2011) des différents vitrages envisagés.

	Planitherm XN	Planitherm ONE	OptiwhiteKGlass	Unité
Fabricant	St Gobain ³	St Gobain ⁴	Pilkington ⁵	-
Construction	4-16-4	4-16-4	4-16-4	-
Gaz	Argon	Argon	Argon	-
U_g	1,1	1,0	1,5	W/(m ² .K)
g	82	49	78	%

IV.1.3 Définition des objectifs

Approche initiale

Dans un premier temps, fort de l'expérience acquise à travers l'étude paramétrique, les objectifs sont formalisés de la manière suivante :

- Maximiser le F_{sol}^{ECS}
- Maximiser le F_{sol}^{CH}
- Minimiser la $Conso_{app}$

Formulé de cette manière, l'approche comporte plusieurs limites. Il est clair que même si les trois objectifs ne sont pas impactés par les mêmes paramètres, une tendance commune existe : l'optimisation risque de converger vers un ensemble de solutions très réduit.

Concernant les deux premiers objectifs, F_{sol}^{ECS} et F_{sol}^{CH} , un autre problème est soulevé. Comme identifié dans la littérature, ces indicateurs évaluent la part solaire respectivement pour la production d'ECS et le chauffage. Cependant une augmentation de la part solaire ne signifie pas forcément une diminution de la part de l'appoint en particulier durant la période estivale où le solaire est abondant. Même si dans ces travaux, la simulation est limitée à la période s'étendant du 1^{er} octobre au 30 avril, il est toujours possible que certains apports solaires soient inutiles, en particulier les apports de chaleur issus des déperditions des ballons.

Enfin, le troisième objectif introduit un biais important sur la surface de PV qui limite l'exploitation de l'algorithme. En effet, l'approche retenue dans ces travaux cherche à caractériser l'ensemble des combinaisons existantes qui permettent d'obtenir une MEPOS solaire. Ainsi deux configurations extrêmes sont identifiées :

- Avoir beaucoup de PV et peu de capteurs thermiques
- Avoir beaucoup de capteurs thermiques et suffisamment de PV pour couvrir les consommations des équipements internes.

Cependant la surface de capteurs PV est uniquement prise en compte dans le calcul de la contrainte. Ainsi, lorsque l'optimisation trouve des solutions minimisant au maximum la $Conso_{tot}$, la surface de capteurs PV ne peut plus augmenter sans que les solutions violent la borne inférieure de la contrainte. En effet d'après Déf. 5, une solution est meilleure qu'une autre si et seulement si elle est meilleure sur un objectif et au moins aussi bonne sur tous les autres. Il est donc clair que comme la surface de PV n'impacte pas les objectifs, des solutions avec une surface de capteurs PV importantes ne sont pas atteignables. En considérant la minimisation de la $Conso_{tot}$ en place de la $Conso_{app}$, un des objectifs tiendrait compte du nombre de capteurs PV. Cependant toujours d'après Déf. 5, le problème reste entier. La sous-section qui suit décrit ainsi une approche permettant de répondre à nos problématiques.

Approche retenue

Afin de pallier les difficultés rencontrées, une autre formulation est proposée :

- Maximiser le F_{sav}^{ECS}
- Maximiser le F_{sav}^{CH}
- Maximiser la $Prod_{PV}$
- Minimiser le $Nombre_{PV}$

Dans cette nouvelle formulation, l'ensemble des paramètres influence au minimum un des objectifs et les différents objectifs sont antinomiques. En effet, réduire la surface de capteur thermique permet d'améliorer la production des PV (plus de capteurs au sud) mais impacte négativement les autres objectifs. Inversement, une surface de capteur thermique importante implique une production des PV plus faible. Ainsi l'ajout d'une maximisation de la $Prod_{PV}$, permet d'obtenir des solutions variées.

De plus en remplaçant les indicateurs F_{sol}^{CH} et F_{sol}^{ECS} par respectivement F_{sav}^{CH} et F_{sav}^{ECS} , l'algorithme favorise non plus les solutions augmentant la part solaire, mais les solutions réduisant la part de l'appoint au profit d'une part plus importante de solaire (IV.5). Pour rappel, la $Conso_{app}$ inclut la consommation des auxiliaires tels que les pompes. Cependant ces nouveaux objectifs nécessitent un modèle de référence afin d'évaluer la réduction de la consommation induite par l'ajout d'un SSC. Comme il est évalué conjointement des variations sur l'enveloppe et sur le SSC, il est nécessaire d'obtenir une consommation de référence pour chaque niveau d'enveloppe afin d'évaluer uniquement l'amélioration induite par le SSC et non l'amélioration apportée par l'amélioration de l'enveloppe. Un modèle de référence sans apports solaires (tout électrique) est donc modélisé. Il admet un unique ballon de 200 l pour le stockage d'ECS et une batterie électrique en terminal pour le chauffage.

$$F_{sav}^{CH} = 1 - \frac{Conso_{app}^{CH}}{Conso_{ref}^{CH}} \quad (IV.5)$$

$$F_{sav}^{ECS} = 1 - \frac{Conso_{app}^{ECS}}{Conso_{ref}^{ECS}} \quad (IV.6)$$

$$F_{sav} = 1 - \frac{Conso_{app}}{Conso_{ref}} \quad (IV.7)$$

Finalement le dernier objectif, minimiser le *Nombre_{PV}*, est introduit afin de proposer des solutions non-dominées sur tout l'intervalle défini par la contrainte. En effet, sans cet objectif les solutions retenues sont toutes proches de la borne inférieure car c'est l'espace de solution maximisant la production des capteurs PV. Cependant ces travaux considèrent que toutes les solutions comprises dans l'intervalle sont admissibles. Il existe en effet, une forte incertitude sur la performance réelle à la fois du bâtiment et des équipements. Ces incertitudes introduites par le choix des hypothèses sont inhérentes à toutes simulations numériques. De plus le parti pris de cette approche est de proposer une large variété de solutions dans le respect de la contrainte de « bilan positif » : proposer des solutions sur l'ensemble de l'intervalle répond à cet objectif.

Le problème est donc maintenant correctement formulé afin de permettre d'explorer l'espace de décision et répondre au problème initial : explorer l'ensemble de solutions non-dominées permettant d'obtenir une MEPOS solaire.

IV.2 Méthode de criblage de Morris

Afin de réduire la cardinalité du problème, la méthode de « screening » de *Morris* est retenue. L'analyse a été réalisée sur Bordeaux et Strasbourg en considérant vingt trajectoires uniques et quatre niveaux. Dans un premier temps les résultats sont discutés pour les principaux indicateurs du SSC. Puis un graphe d'influence est réalisé sur les indicateurs F_{sol}^{CH} , F_{sol}^{ECS} , $Conso_{app}$, et $Conso_{tot}$ permettant de représenter les facteurs influents considérés dans le reste de l'étude.

IV.2.1 Hypothèses

La méthode de *Morris* nécessite que les variables soient continues et puissent varier indépendamment les unes des autres. Ainsi pour des variables qualitatives comme le type de capteurs solaires thermiques et le type de vitrage, les caractéristiques principales ont été considérées comme indépendantes uniquement lors de l'étude de sensibilité. Ce choix est fait uniquement afin d'évaluer de possibles interactions existantes avec d'autres facteurs. Bien entendu, dans le reste de l'étude, les capteurs et vitrages sont considérés comme qualitatifs et ne pourront prendre que les caractéristiques complètes de chaque type.

Les propriétés des capteurs sont ainsi exprimées en fonction des coefficients a_1 , a_2 , et du rendement optique (η_0). Le capteur *IDMK 25-AL* est utilisé comme référence et la variations de chaque coefficient remplace la valeur originelle. Les caractéristiques des vitrages sont exprimées en fonction de l'émissivité du verre intérieur ($\dot{E}mis_{int}$) et du coefficient de transmission solaire (τ_{sol}). Ainsi il est considéré uniquement le vitrage *Planitherm XN* pour lequel les caractéristiques varient. Les bornes inférieures et supérieures retenues sont issues des caractéristiques des différents capteurs et vitrages considérés (Tab. IV.4). Bien que la méthode de *Morris* permette de regrouper les paramètres afin d'évaluer l'influence de l'ensemble et non de chaque élément le composant, les éléments groupés

nécessitent de pouvoir varier indépendamment : l'option n'est donc pas applicable à notre cas.

Moins contraignant, l'échantillon créé par la méthode de *Morris* suppose que chaque variable est continue. Dans notre cas, le nombre de capteurs solaires thermiques et de capteurs PV est cependant obligatoirement un entier. Afin de contourner ce problème, la plage de variation de ces deux facteurs a été choisie comme :

- 2 à 5 capteurs solaires thermiques soit une variation de 7 m²
- 8 à 14 capteurs PV soit une variation de 9 m²

Ce choix est fait afin d'obtenir la surface équivalente la plus proche possible, tout en assurant que les valeurs prises lors de la création de l'échantillon sont des entiers (vrai seulement lorsque l'échantillonnage considère quatre niveaux).

TABLE IV.4 – Variabilité des caractéristiques des capteurs et des vitrages pour l'étude de sensibilité.

	Borne min	Borne max		Borne min	Borne max
Vitrages			Capteurs solaires		
$\dot{E}mis_{int}$	0,047	0,837	a_1	0,749	5,116
τ_{sol}	0,643	0,849	a_2	0,004	0,023
			η_0	0,644	0,764

IV.2.2 Analyse des résultats

Cette section discute les résultats obtenus par la méthode de criblage pour les principaux indicateurs caractérisant un SSC :

- La couverture solaire sur l'eau chaude sanitaire (F_{sol}^{ECS})
- La couverture solaire sur le chauffage (F_{sol}^{CH})
- La consommation de l'appoint ($Conso_{app}$)
- La consommation de l'appoint et des autres usages domestiques ($Conso_{tot}$)
- La production solaire ($Prod_{sol}$)

Comme l'étude considère deux climats, le nombre de courbes nécessaires pour appuyer les remarques est trop important pour être ajouté dans le corps du document sans gêner la lecture. Le choix a donc été de fait de présenter uniquement les courbes les plus importantes et de fournir le reste en annexe (F).

Couverture solaire sur l'eau chaude sanitaire

Les mêmes facteurs influents sont identifiés pour l'indicateur F_{sol}^{ECS} que ce soit pour Bordeaux ou Strasbourg, cependant les interactions et l'ordre d'importance diffèrent (Fig. IV.3). Dans les deux cas le nombre de capteurs TH et le volume du ballon ECS sont les facteurs les plus influents. Sur Bordeaux, les facteurs ΔT_{sol} , $\Delta min_{capteur}$, et Δmin_{tampon} ont des effets non-linéaires ou avec des interactions alors que les autres ont des impacts linéaires. Sur Strasbourg, chaque facteur a un impact linéaire à l'exception de ΔT_{sol} dont l'influence peut être estimée comme non-linéaire ou avec des interactions. Bien que n'ayant pas d'action directe sur la production d'ECS, la performance thermique des vitrages est évaluée comme faiblement influente. Le SSC répartissant l'énergie solaire disponible entre chauffage et production d'ECS, réduire les besoins de chauffage permet de valoriser une plus grande part de l'énergie solaire disponible pour la production d'ECS.

tampon et le nombre de capteurs solaires thermiques sont les plus influents. Les caractéristiques de l'enveloppe, exception faite des vitrages, ne sont pas parmi les plus influentes même sur le climat strasbourgeois où les besoins en chauffage sont importants. La résistance thermique du plancher ne fait d'ailleurs pas partie des facteurs influents retenus. Sur Bordeaux et sur Strasbourg les paramètres liés au réglage de l'algorithme de contrôle (ΔT_{sol} , $\Delta min_{capteur}$, Δmin_{tampon}) sont aussi identifiés comme fortement influents. Il est aussi noté pour Bordeaux un faible impact de la Ech_{sol}^{pos} et de la surface vitrée à l'est. L'épaisseur de l'isolant du ballon tampon semble aussi être influente sur Bordeaux mais pas sur Strasbourg.

Afin de mieux comprendre pourquoi ces paramètres sont influents, l'analyse de *Morris* est réalisée en distinguant la part active ($Prod_{sol}^{CH}$ active) de la part passive (pertes des ballons, $Prod_{sol}^{CH}$ passive) (Fig. IV.4). Pour Bordeaux et Strasbourg, il est ainsi mis en évidence que l'amélioration de l'isolation des ballons à un effet négatif sur la part passive mais aucun effet sur la part active. À l'inverse lorsque le paramètre $\dot{E}mis_{int}$ augmente (U_g diminue) la part solaire active est plus importante mais la part passive ne varie pas. Il semble donc qu'il existe un compromis entre la qualité de l'enveloppe et la part des consommations couverte par le solaire. De plus pour Bordeaux, si seule la part active est considérée il est noté que les facteurs influents sont principalement, le nombre de capteurs, la performance des vitrages, et le Δmin_{tampon} . En effet, augmenter le volume du ballon ECS améliore la part solaire passive mais diminue la part active, expliquant pourquoi ce facteur est fortement non-linéaire ou avec des interactions mais ne fait pas partie des principaux facteurs. Par contre l'augmentation du volume du ballon tampon améliore à la fois la part active et la part passive même si le facteur est plus influent sur cette dernière.

L'analyse des facteurs liés à l'algorithme de contrôle est par contre plus complexe. Augmenter le Δmin_{tampon} semble influencer négativement la part active sur Bordeaux et Strasbourg, mais permet d'améliorer la part passive uniquement sur Strasbourg. Les conditions d'ensoleillement étant meilleures et les besoins moins élevés sur Bordeaux, le ballon tampon est en moyenne à une température plus élevée et faire varier le Δmin_{tampon} est donc moins impactant. Aussi il est observé que augmenter le $\Delta min_{capteur}$ impacte négativement la part solaire active sur Strasbourg et est fortement non-linéaire ou avec des interactions sur Bordeaux (annexe, Fig. F.2). Finalement le ΔT_{sol} a un impact non-linéaire ou avec des interactions sur Strasbourg pour la part solaire active mais ne fait pas partie des facteurs influents sur Bordeaux.

Bilan : La complexité liée à l'évaluation couplée d'un SSC et d'un bâtiment a été exposée. Bien que les facteurs identifiés comme influents soient similaires entre Bordeaux et Strasbourg, l'analyse détaillée considérant séparément la part solaire active et passive met en évidence que le SSC ne se comporte pas de la même manière sur les deux climats.

Au cours du chapitre II, il a été montré que le SSC, en fonction des caractéristiques des ballons (position de l'échangeur ou volume des ballons), répartit l'énergie solaire entre chauffage et production d'ECS de manière différente sans nécessairement modifier la couverture solaire globale. L'analyse de *Morris* met aussi en exergue que les caractéristiques des équipements influencent la manière dont le SSC couvre les besoins en chauffage. En effet pour une même valeur de F_{sol}^{CH} , les besoins sont couverts soit indirectement par les déperditions des ballons, soit directement grâce au système de chauffage aéraulique. Il n'existe cependant pas à la connaissance de l'auteur de moyens pour identifier la part réellement utile dans les apports solaires indirects. En considérant la part économisée sur l'appoint, seule l'énergie solaire utile est implicitement prise en compte. Le choix des objectifs F_{sav}^{ECS} et F_{sav}^{CH} en place des indicateurs F_{sol}^{ECS} et F_{sol}^{CH} est donc plus pertinent.

Finalement l'existence d'un compromis entre qualité de l'enveloppe et performance du SSC sur le chauffage, est aussi identifiée.

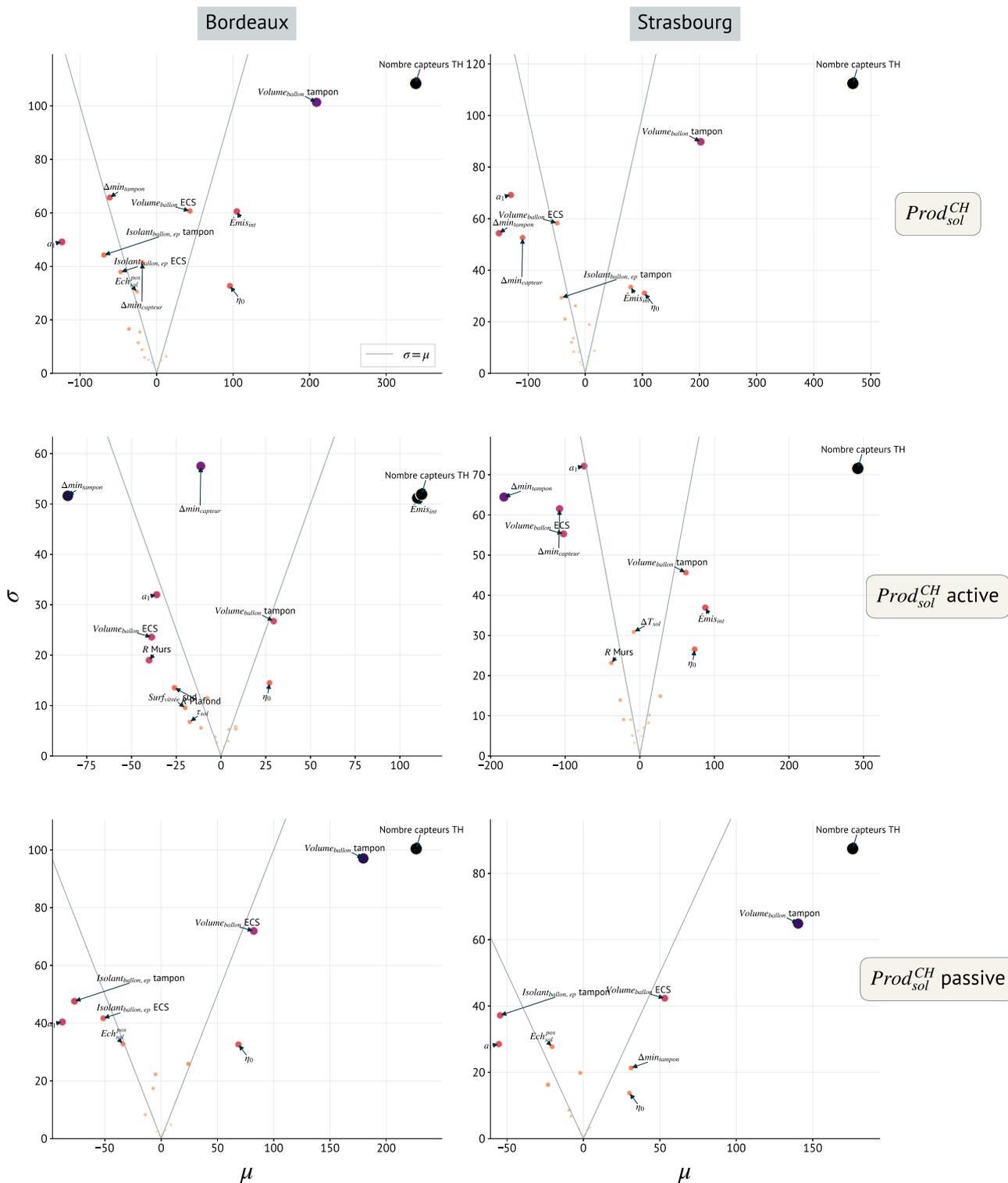


FIGURE IV.4 – Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{CH}$ ($f(\mu) = \sigma$) où les trois indicateurs sont exprimés en kWh.

Consommation de l'appoint

Sur la $Conso_{app}$ (Fig. IV.3) les facteurs les plus influents sont pour les deux climats : le nombre de capteurs solaires thermiques et l' $\acute{E}mis_{int}$ des vitrages. Les autres caractéristiques de l'enveloppe ont aussi une influence linéaire (R plafond, R murs) sur Bordeaux et Strasbourg. La qualité du plancher par contre a un impact uniquement sur Strasbourg. Les caractéristiques de l'enveloppe sont donc sur

Strasbourg toutes influentes et la performance du vitrage est le facteur prédominant.

L'algorithme semble aussi influencer directement la consommation de l'appoint avec Δmin_{tampon} sur Bordeaux et $\Delta min_{capteur}$ sur Strasbourg, les deux ayant une influence non-linéaire ou avec des interactions. Enfin le volume du ballon ECS est un facteur important dans les deux climats alors que le volume de l'appoint n'est influent que sur Strasbourg.

Afin de mieux comprendre, l'analyse est détaillée en séparant la part attribuée au chauffage et à la production d'ECS (Fig. IV.5).

Si on considère uniquement les consommations sur le chauffage ($Conso_{app}^{CH}$), la qualité thermique du vitrage arrive largement devant les autres facteurs que ce soit pour Bordeaux ou Strasbourg. Sur Bordeaux le nombre de capteurs solaires thermiques est aussi fortement impactant par rapport aux autres facteurs. Sur Strasbourg, la performance thermique des murs est aussi influente que le nombre de capteurs solaires car les besoins en chauffage sont importants. Sur la $Conso_{app}^{CH}$, Δmin_{tampon} et $\Delta min_{capteur}$ sont influents pour les deux climats. Sur la $Conso_{app}^{ECS}$, Δmin_{tampon} est le seul facteur impactant pour Bordeaux. Par contre sur Strasbourg, $\Delta min_{capteur}$ est aussi un facteur influent. En effet, les besoins en chauffage étant faibles sur Bordeaux relativement aux besoins pour la production d'ECS, la consommation totale ($Conso_{app}$) est uniquement influencée par Δmin_{tampon} . La même observation peut être faite sur Bordeaux pour le ballon de stockage dont le volume impacte uniquement la $Conso_{app}^{CH}$. Enfin les caractéristiques des capteurs sont influentes à la fois sur la $Conso_{app}^{CH}$ et la $Conso_{app}^{ECS}$.

Bilan : Les besoins en chauffage sur Strasbourg étant plus élevés que sur Bordeaux, les facteurs caractérisant l'enveloppe sont tous influents que ce soit sur la $Conso_{app}^{CH}$ ou la $Conso_{app}$. Sur Bordeaux où le chauffage représente une part moindre par rapport aux besoins en ECS, les facteurs peu impactant sur le chauffage n'apparaissent pas lorsque la $Conso_{app}$ est considérée. Cette tendance est de plus renforcée par l'ensoleillement plus important sur Bordeaux, permettant au SSC de couvrir une part plus conséquente des besoins et donc de diminuer la variation de la consommation du chauffage lorsque l'enveloppe est modifiée. Ces résultats confirment la nécessité de considérer les systèmes et l'enveloppe de concert afin de proposer une solution adaptée aux contraintes du climat.

Consommation totale

Concernant la consommation totale, le nombre de capteurs PV est sans surprise, le plus influent. En effet, les consommations propres aux charges internes (électro-domestique et éclairage) représentent une part importante des consommations. De plus, la surface de capteurs thermiques minimale permet déjà de couvrir une part importante des besoins, notamment sur la production d'ECS. Il est aussi important de garder à l'esprit que la surface de capteur PV varie de 2 m² de plus que celle des capteurs solaires thermiques pour les raisons explicitées en introduction de section. Ces observations permettent d'expliquer pourquoi le nombre de capteur PV est le facteur le plus influent. Ainsi, sur Strasbourg où les besoins en ECS et en chauffage sont prédominants, la performance des vitrages et le nombre de capteurs solaires thermiques sont aussi fortement influents.

Valorisation de l'énergie solaire :

Cette dernière partie décrit les facteurs influençant la part solaire absorbée au niveau des capteurs ($Prod_{sol}$), les pertes en ligne ($Pertes_{réseau}$), et la part solaire valorisée ($Prod_{sol}^{valorisée} = Prod_{sol} - Pertes_{réseau}$) (Fig. IV.6).

Pour Bordeaux comme Strasbourg le volume des ballons, le type de capteur, et le nombre de capteurs solaires influencent la $Prod_{sol}^{valorisée}$. Comme observée pour la $Conso_{app}$, le $\Delta min_{capteur}$ n'est influent que sur le climat de Strasbourg, et le Δmin_{tampon} ne l'est que sur Bordeaux. Ces deux facteurs ayant une influence non-linéaire ou avec des interactions. Sur Bordeaux, il est aussi mis en évidence que

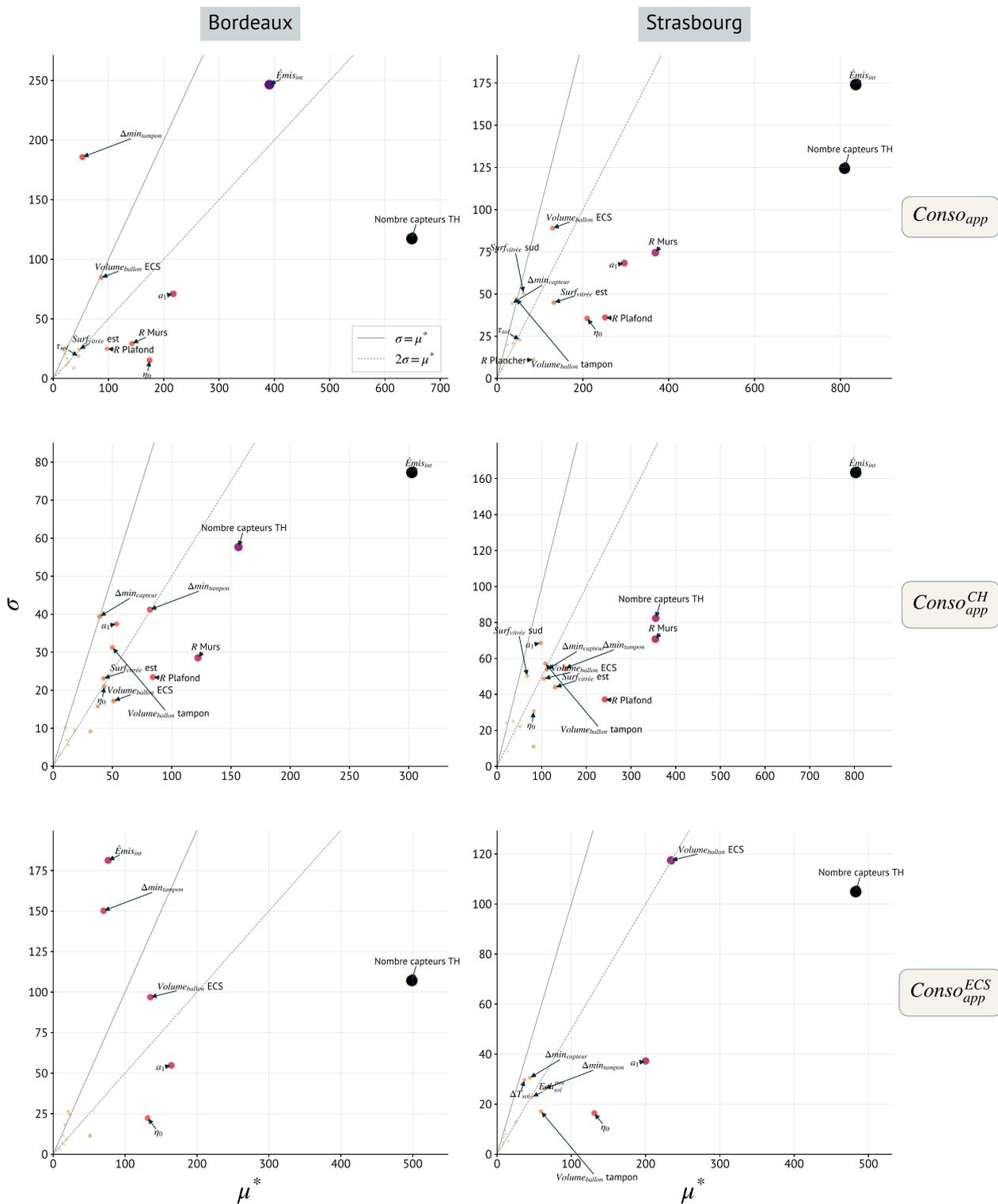


FIGURE IV.5 – Résultat de l’analyse de Morris sur le détail de la $Conso_{app}$ ($f(\mu^*) = \sigma$) où les trois indicateurs sont exprimés en kWh.

la performance des vitrages a un impact non linéaire ou avec des interaction importantes. Afin de l’expliquer, il est nécessaire de croiser plusieurs informations. Il a été vu qu’un compromis existe entre qualité de l’enveloppe et performance du SSC sur le chauffage (IV.2.2). De plus, les résultats de l’étude paramétrique montrent que sur le climat de Bordeaux, les besoins en chauffage sont faibles et que le solaire peut en couvrir la majeure partie. Avec un climat disposant d’un ensoleillement im-

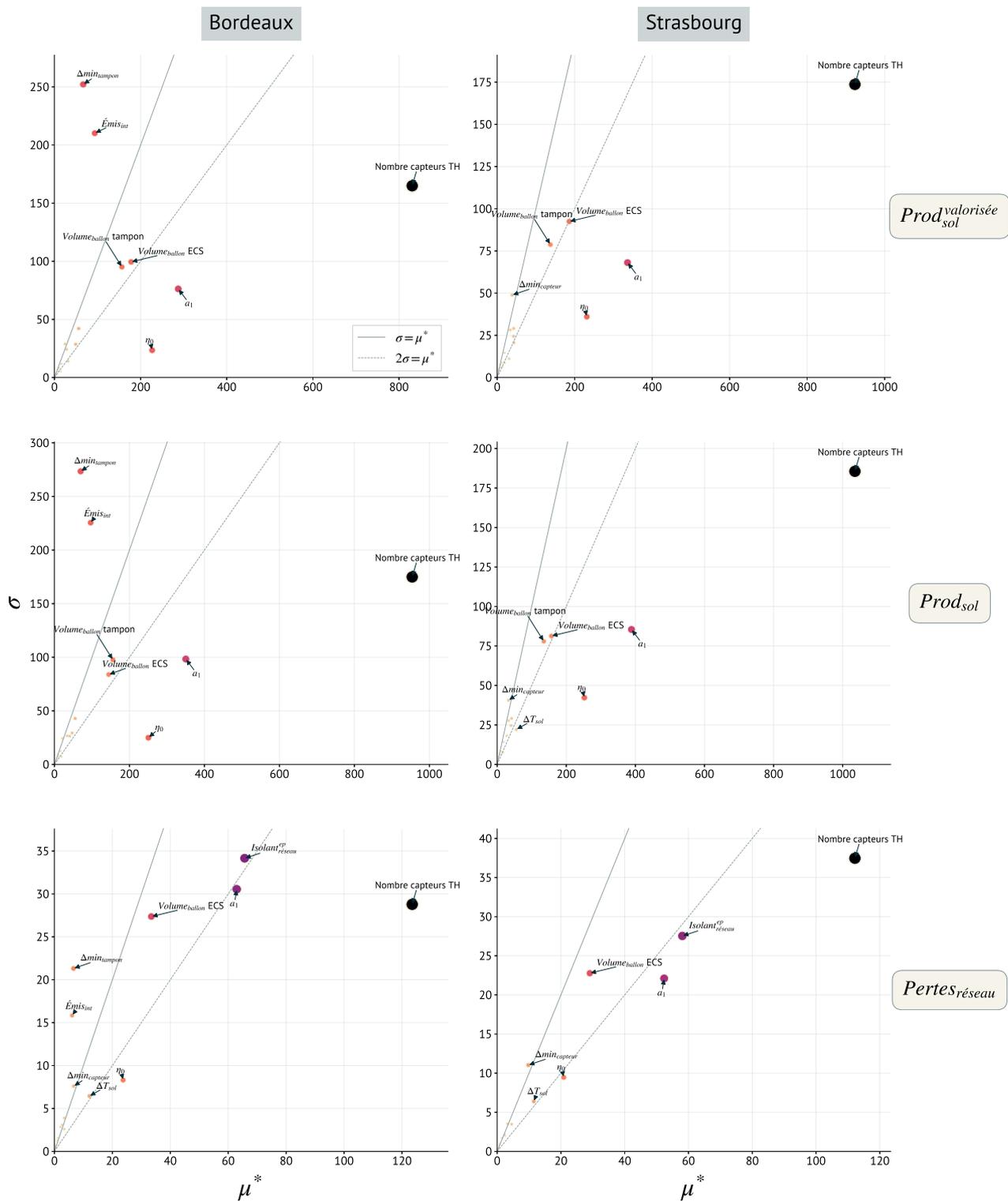


FIGURE IV.6 – Résultat de l’analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{valorisée}$ ($f(\mu^*) = \sigma$) où les trois indicateurs sont exprimés en kWh.

portant, le SSC sur Bordeaux peut fournir l’énergie supplémentaire nécessaire lorsque les besoins de chauffage augmentent (augmentation de l’ $E_{mis_{int}}$). Sur Strasbourg ce facteur n’est donc pas influent car le SSC couvre moins bien les besoins de chauffage qui sont de surcroît plus importants. De plus l’ensoleillement est moindre et l’augmentation des pertes thermiques induites par une diminution de la performance des vitrages est plus grande.

Enfin, les $Pertes_{réseau}$ sont fortement impactées par la surface totale de capteur et l'épaisseur de l'isolant au niveau des canalisations. Le volume du ballon sanitaire a aussi un impact important et le réduire augmente les pertes en ligne (annexe, Fig. F.4). Les paramètres de l'algorithmique impactent aussi les $Pertes_{réseau}$. $\Delta min_{capteur}$ a en effet une influence non-linéaire ou avec interaction pour les deux climats alors que Δmin_{tampon} est influent uniquement sur Bordeaux. La part solaire perdue en ligne ($Pertes_{réseau}$) étant faible au regard des apports solaires ($Prod_{sol}$), l'isolation des canalisations ($Isolant_{réseau}^{ep}$) n'est pas influente sur la $Prod_{sol}^{valorisée}$. Par extension, elle n'est pas influente non plus sur les indicateurs F_{sol}^{ECS} ou F_{sol}^{CH} .

IV.2.3 Paramètres retenus a posteriori

L'analyse de sensibilité a permis de réduire le nombre de critères de décision pour Bordeaux et Strasbourg. Ainsi sur les 21 facteurs a priori, 14 ont été retenus pour Bordeaux et 15 pour Strasbourg dont les bornes de variation sont décrites dans Tab. IV.5. Pour l'indicateur $Conso_{app}$, il est retenu l'ensemble des paramètres pour lesquels $\mu^* > 50$ kWh ou $\sigma > 50$ kWh. Pour les indicateurs F_{sol}^{ECS} et F_{sol}^{ECS} les facteurs retenus respectent les contraintes suivantes : $\mu^* > 0.015$ ou $\sigma > 0.015$. Aussi, suite aux observations faites dans l'analyse des résultats, la borne maximale pour le volume des ballons a été réajustée à 400l maximum par ballon contre 500l auparavant. Les résultats du criblage sont aussi présentés sous une forme synthétique grâce à un graphe d'influence qui décrit le lien entre chaque facteur, et chaque indicateur (Fig. IV.7). La visualisation permet de mettre en évidence les facteurs qui sont uniquement influents pour un indicateur (Surfaces vitrées, isolation du ballon tampon...) et ceux qui en impactent plusieurs (type de vitrage, nombre de capteurs PV...).

L'analyse a aussi permis de mettre en évidence plusieurs remarques :

- Le SSC est fortement influencé par des éléments de l'enveloppe, des équipements, mais aussi par les variations algorithmiques.
- 16 facteurs différents ont été identifiés comme influents sur les objectifs de l'optimisation pour Bordeaux et Strasbourg cumulés.
- Augmenter l'isolation des canalisations n'est pas utile.
- Les variations du SSC sont plus influentes lorsque la $Conso_{app}$ est plus importante que la consommation des équipements internes.
- Le potentiel de réduction de la consommation de l'appoint est plus important pour Strasbourg que Bordeaux.
- Il existe un compromis entre qualité de l'enveloppe, la performance du SSC et la surface installée de capteur PV.
- Le dimensionnement d'un bâtiment doit être le résultat d'une évaluation couplée du bâtiment et du système installé, en particulier lorsque le système utilise des énergies renouvelables.

Malgré une réduction du nombre de paramètres de décisions, la temps de simulation important est toujours un frein à l'application d'une méthode d'optimisation par méta-heuristique. De plus, il est nécessaire d'évaluer en parallèle le modèle de référence pour chaque variation de l'enveloppe afin de pouvoir calculer l'économie d'appoint permise par le SSC : F_{sav}^{CH} et F_{sav}^{ECS} . Il est donc proposé d'utiliser des modèles de substitution.

TABLE IV.5 – Description des paramètres retenus pour l’optimisation. Les facteurs uniquement retenus sur Bordeaux ont un fond crème, et ceux uniquement pour Strasbourg sous un fond gris.

	Min	Max	Catégorie	Pas	Remarques
SSC					
Nombre capteurs TH	2	5	Discrète	1	4,6 m ² à 11,6 m ²
Nombre capteurs TH	2	7	Discrète	1	4,6 m ² à 16,2 m ²
Type capteurs TH	-	-	Qualitative	-	Voir Tab. IV.2
Ech_{sol}^{pos}	0,8	1,3	Continue	-	Position relative à la hauteur du ballon
Volume ballon tampon	100	400	Discrète	50	Dimensions adaptées proportionnellement
Volume ballon ECS	100	400	Discrète	50	
$Isolant_{ballon}$ tampon	0,055	0,12	Discrète	50	Résistance dépendante du volume du ballon
ΔT_{sol}	5	20	Continue	-	-
$\Delta min_{capteur}$	0	30	Continue	-	-
Δmin_{tampon}	0	30	Continue	-	-
Enveloppe du bâtiment					
R murs	4	7	Discrète	0,5	-
R plafond	6	10	Discrète	0,5	-
R plancher	6	10	Discrète	0,5	-
Surface vitrée sud	5,42	8,13	Continue	-	-
Surface vitrée est	4,3	6,46	Continue	-	-
Type de vitrage	-	-	Qualitative	-	Voir Tab. IV.3
Production d’électricité					
Nombre capteurs PV	14	24	Discrète	1	23,0 m ² à 39,4 m ²

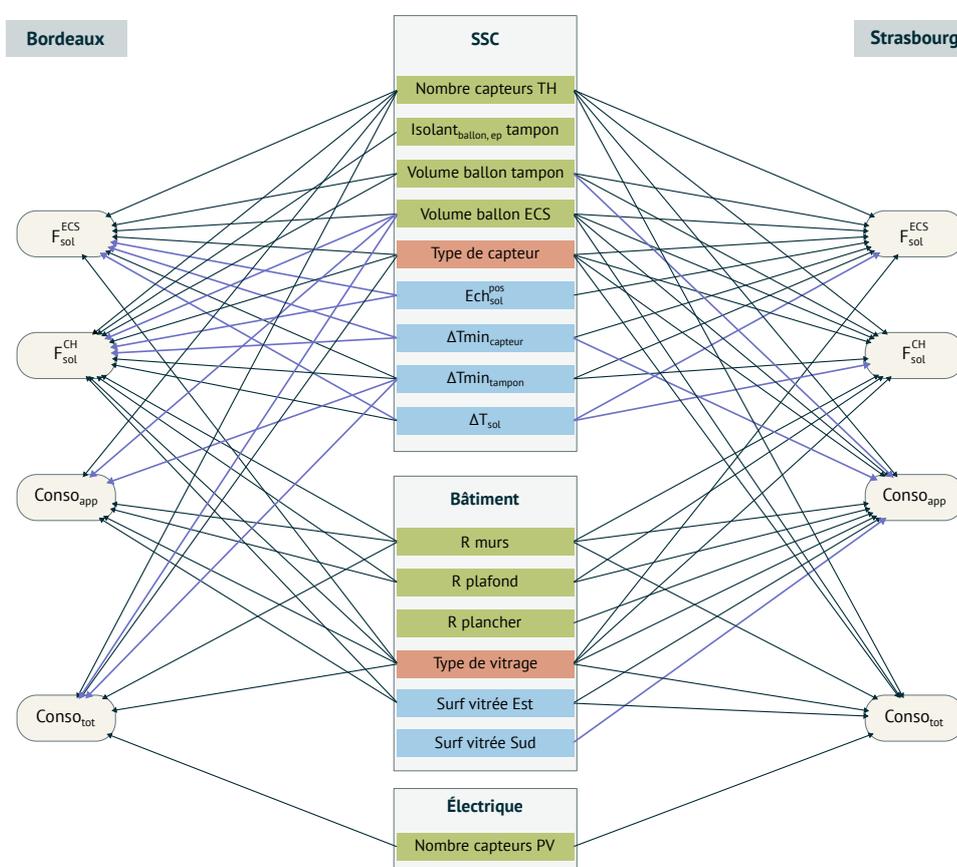


FIGURE IV.7 – Graphe d’influence du SSC pour Bordeaux (gauche) et Strasbourg (droite). Les relations linéaires sont en noires, et les relations non-linéaires ou avec interactions en bleues.

IV.3 Construction des modèles de substitution

IV.3.1 Création de l'échantillon

Grâce à une approche par criblage, les variables de décisions non influentes ont pu être écartées. La combinatoire du problème ainsi réduite permet d'éviter l'évaluation de variations non influentes. Cependant le temps de simulation est toujours un facteur limitant et ne permet pas de réaliser l'optimisation dans des temps raisonnables. En effet, il est nécessaire de compter 1 h à 3 h pour simuler le modèle du SSC et 10 min à 30 min pour le système de référence avec un ordinateur équipée d'un processeur *i7* – 4800MQ 2,7 GHz. Ainsi huit modèles de substitution sont utilisés pour approximer le calcul des indicateurs sur Bordeaux et Strasbourg (quatre par climat) :

- La consommation de l'appoint pour le chauffage ($Conso_{app}^{CH}$)
- La consommation de référence sur le chauffage ($Conso_{ref}^{CH}$)
- La consommation de l'appoint pour la production d'ECS ($Conso_{app}^{ECS}$)
- La consommation cumulée de l'appoint pour le chauffage et l'ECS ($Conso_{app}$)

Ces indicateurs ne correspondent pas directement aux objectifs mais permettent de les calculer. Avec (IV.5) il est possible d'obtenir F_{sav}^{CH} et F_{sav}^{ECS} , et avec (IV.2), il est possible de calculer la $Conso_{tot}$. Ce choix est préféré car il est plus modulaire. En considérant séparément les consommations du système de référence et du SSC, les deux modèles restent indépendants. Il est ainsi possible de modifier un des modèles sans impacter le second. Pour rappel, le modèle de référence est évalué pour chaque variation de l'enveloppe afin de considérer uniquement le gain apporté par le solaire et non par l'enveloppe. Concernant les autres objectifs, un modèle de substitution n'est pas nécessaire. La production des capteurs PV est pré-calculée en considérant la répartition décrite dans (IV.1) et la $Conso_{ref}^{ECS}$ est très peu impactée par les variations de l'enveloppe. Sur Bordeaux elle est pour une année complète de (2588 ± 4) kWh et de (2866 ± 2) kWh pour Strasbourg et est donc considérée comme constante dans le reste du document.

La méthodologie décrite dans III.2.2 est appliquée pour construire les quatre échantillons nécessaires : un pour le système de référence et un pour le SSC pour les deux climats (2×2 échantillons). Les solutions sont générées pseudo-aléatoirement à partir d'une suite à faible discrétion qui permet d'obtenir un échantillon équitablement réparti offrant une bonne représentativité de l'espace de décision. Une fois l'échantillon simulé, la bibliothèque *OpenTurns*⁶ et les travaux de MERHEB (2013) sont utilisés pour construire les modèles de substitution. Étant en phase de conception et cherchant à explorer l'ensemble du domaine de recherche, une loi uniforme est considérée pour chaque paramètre. Afin de prendre en compte les variables qualitatives, une substitution est nécessaire. Pour les capteurs, il apparaît nécessaire de tenir compte du rendement optique (η_0) mais aussi du coefficient de pertes linéiques (a_1) car uniquement considérer l'un des deux réduit la précision du méta-modèle. Pour le vitrage, le coefficient de pertes thermique (U_g) est suffisant. La précision des modèles de substitution par rapport au modèle original est évaluée sur deux critères : l'erreur quadratique moyenne (RMSE, Root Mean Square Error) et l'erreur absolue maximale (MAE, Maximal Absolute Error). La RMSE permet d'évaluer l'écart moyen entre, les sorties du méta-modèle (\mathcal{M}), et celles du modèle original (f) (IV.8). La MAE permet d'obtenir l'écart maximal existant entre le méta-modèle et le modèle de référence (IV.9).

Pour le système de référence, l'échantillon est construit en faisant varier les différents paramètres de l'enveloppe soit six facteurs. Pour le système solaire l'ensemble des variables influentes est considéré, soit respectivement 14 et 15 facteurs pour Bordeaux et Strasbourg (Tab. IV.5). La qualité de l'approximation est discutée pour différentes tailles d'échantillons dans la section qui suit.

6. <http://openturns.org/>

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f(\vec{x}_i) - \mathcal{M}(\vec{x}_i)]^2} \quad (\text{IV.8})$$

$$\text{MAE} = \max(|f(\vec{x}_i) - \mathcal{M}(\vec{x}_i)|, x = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{IV.9})$$

IV.3.2 Sélection des méta-modèles

Afin d’offrir une meilleure lisibilité, seuls les principaux résultats sont intégrés dans le cœur du document. Cependant comme pour l’étude de sensibilité, tous les résultats sont disponibles en annexes (G).

Pour l’indicateur $Conso_{ref}^{CH}$, peu de simulations ont été nécessaires afin d’obtenir une bonne approximation (Fig. IV.8). L’ordre du méta-modèle (degré maximal du polynôme après troncation) est défini par la zone grise associée à l’axe vertical de droite.

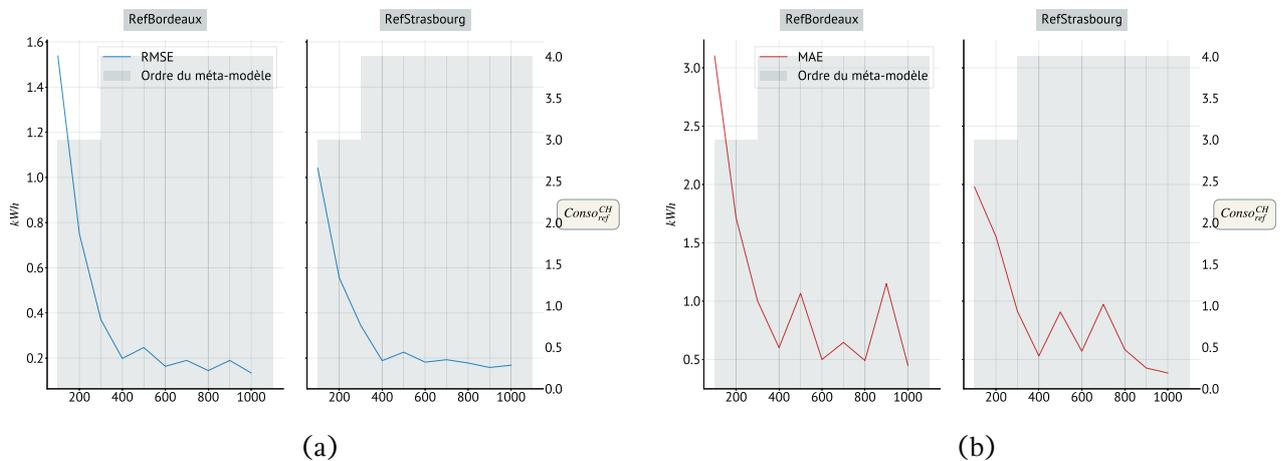


FIGURE IV.8 – Évolution de l’erreur quadratique moyenne (RMSE) (a) et de l’erreur absolue maximale (MAE) (b) pour le système de référence en fonction de la taille de l’échantillon.

En effet, à partir d’un échantillon de taille 100, le méta-modèle est d’ordre trois et précis à $\pm 1,5$ kWh. À partir de 400 simulations l’erreur quadratique moyenne et l’erreur absolue stagne toutes les deux en dessous de 0,5 kWh (Tab. IV.6). Au regard des résultats, un échantillon de taille 400 est donc suffisant pour obtenir une bonne approximation.

Le modèle du SSC étant plus complexe, un nombre plus important de simulations est nécessaire. Premièrement car le nombre de combinaisons est plus important et modifie à la fois le système et l’enveloppe. Deuxièmement, à cause des fortes interactions identifiées entre les parts solaires respectives sur le chauffage et l’ECS. Ainsi, il est à minima nécessaire de considérer un échantillon de taille 600 afin d’approcher correctement le modèle original (Fig. IV.9). Entre 600 et 1000, la qualité de l’approximation oscille pour les trois indicateurs sur Bordeaux comme sur Strasbourg. Enfin au delà de 1000, l’approximation s’améliore lentement même si sur Strasbourg, l’erreur absolue maximale continue d’osciller. Ainsi, pour les trois méta-modèles, un échantillon de taille 600 est pertinent. L’erreur moyenne quadratique est pour Bordeaux inférieure à 3,5 % et l’erreur maximale absolue inférieure à 8 %. Sur Strasbourg l’erreur moyenne quadratique est inférieure à 2,7 % et l’erreur absolue maximale inférieure à 6,8 %. Bien que l’erreur maximale ne soit pas négligeable, elle reste faible au regard des incertitudes liées à l’évaluation de tels systèmes (isolation, rendement des équipements, gains internes, apports solaires...)

Comme explicité dans le chapitre précédent, 90 % de l’échantillon sont utilisés pour construire

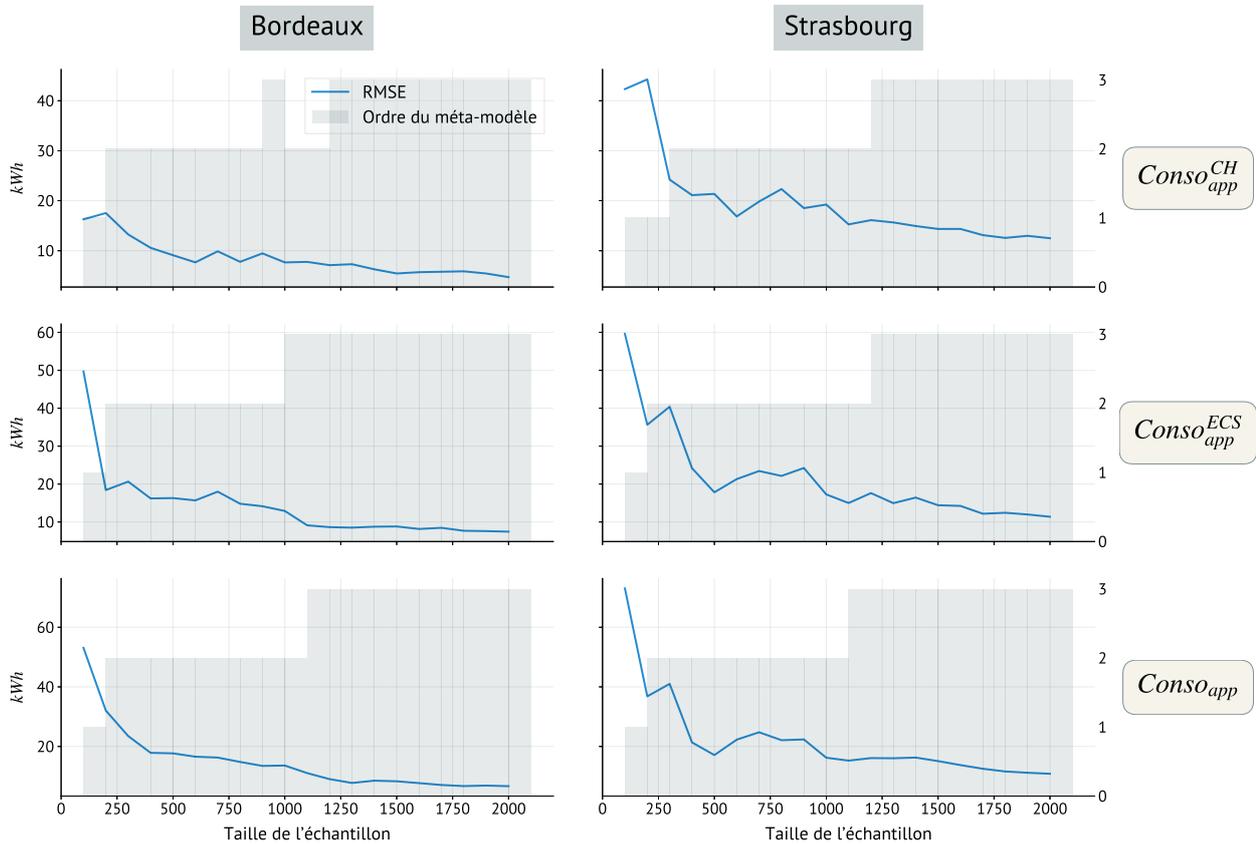


FIGURE IV.9 – Évolution de la RMSE pour les trois méta-modèles caractérisant le SSC en fonction de la taille de l'échantillon.

le modèle de substitution et 10 % sont uniquement utilisés pour la validation à travers le calcul de la RMSE et de la MAE. Les résultats obtenus (Fig. IV.10) montrent que les points sont en effet quasiment tous compris sur la droite d'équation $x = y$ qui indique une approximation parfaite du modèle original. Les solutions les moins bien approximées sont pour des consommations importantes alors que l'optimisation cherche à les minimiser.

Finalement, Tab. IV.6 récapitule les informations concernant les modèles de substitution retenus mais aussi la variabilité de chaque indicateur observée sur les 2000 simulations. Sur les huit meta-modèles, sept sont d'ordre deux et un seul est d'ordre trois : le modèle substituant le calcul de la $Conso_{ref}^{CH}$ sur Strasbourg. Un écart de consommation important entre Bordeaux et Strasbourg est observé : la consommation maximale sur Bordeaux et similaire à la consommation minimale sur Strasbourg. Sur l'ECS la variation est un peu plus importante sur Strasbourg alors que les besoins sont identiques. En effet, les besoins sont les mêmes pour les deux climats, mais la température de l'eau du réseau est différente. Aussi, la consommation en chauffage semble secondaire sur Bordeaux alors qu'elle est importante sur Strasbourg. Finalement l'échantillon met déjà en avant l'intérêt d'un SSC, en particulier sur la production d'ECS qui est sans solaire de 2588 kWh pour Bordeaux et de 2866 kWh pour Strasbourg.

Dans la partie suivante, les méta-modèles sont confrontés aux solutions obtenues au cours du processus d'optimisation et les résultats sont discutés.

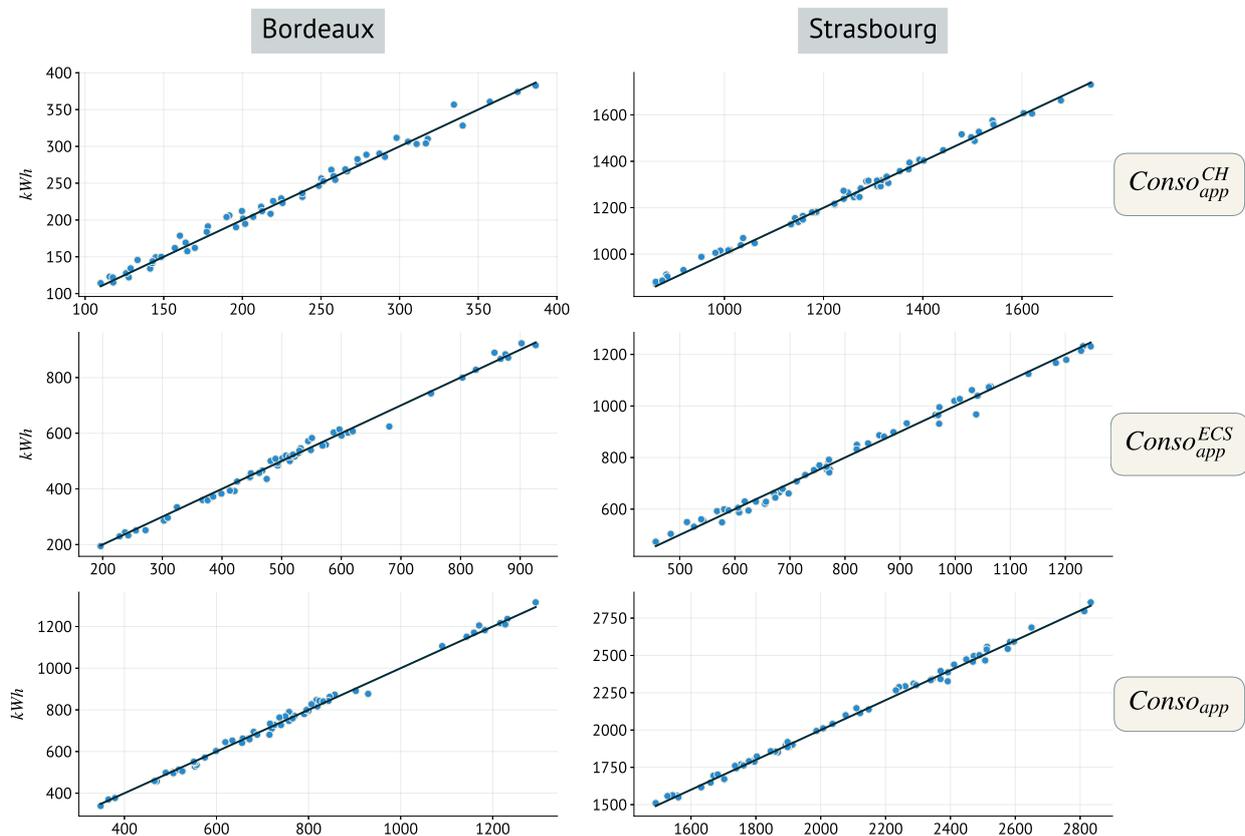


FIGURE IV.10 – Évolution des résultats obtenus par les méta-modèles (axes Y) et du modèle original (axes X). La ligne noire représente une approximation parfaite.

TABLE IV.6 – Erreurs caractéristiques (RMSE et MAE) des huit méta-modèles retenus (kWh).

	Bordeaux				Strasbourg				Taille échantillon
	RMSE	MAE	Ordre	Variation	RMSE	MAE	Ordre	Variation	
$Conso_{ref}^{CH}$	0,2	0,6	2	228 à 620	0,19	0,93	3	1363 à 2110	400
$Conso_{app}^{CH}$	7,7	22,0	2	84 à 440	16,9	38,0	2	612 à 1861	600
$Conso_{app}^{ECS}$	15,7	56,4	2	156 à 1043	21,3	70,8	2	397 à 1360	600
$Conso_{app}$	16,6	52,4	2	324 à 1372	22,3	65,1	2	1222 à 3117	600

IV.4 Optimisation multi-objectifs

Dans l'optique de ces travaux, il a été proposé d'évaluer la performance couplée du système et du bâtiment à travers un processus d'optimisation. Dans un premier temps un ensemble de paramètres a priori couvrant à la fois des variations au niveau du système (logique de contrôle et équipements), et des variations de l'enveloppe, ont été proposés. Puis, grâce à une méthode de criblage le nombre de facteurs a été limité aux plus impactants puis des méta-modèles ont été construits afin de se substituer aux modèles originaux dont le temps d'évaluation est trop important. Cette partie s'intéresse à l'analyse des solutions obtenues à travers l'optimisation. Dans un premier temps le paramétrage de l'algorithme puis l'évolution de la recherche sont discutés. Suit l'évaluation de la qualité de l'approximation des méta-modèles pour les solutions du front de Pareto. Puis, l'ensemble des solutions optimales (front de Pareto) est détaillé de manière globale. Une étude plus spécifique est ensuite réalisée sur :

- L'influence du nombre de capteurs photovoltaïques.
- L'influence du nombre et du type des capteurs solaires thermiques.
- L'influence du volume des ballons, tampon et d'ECS et de la logique de contrôle.
- Les corrélations entre enveloppe et performance du SSC.

En dernière partie, l'aide à la décision est illustrée sur Strasbourg en fonction de critères fictifs et une sélection de solutions optimales est discutée.

IV.4.1 Paramétrage de l'optimisation

L'algorithme de colonie d'abeilles virtuelles (III.4.7) est utilisé afin de réaliser l'optimisation multi-objectifs. L'optimisation est réalisée sur quatre objectifs et est contrainte afin d'obtenir uniquement des solutions à énergie positive (IV.1.3) :

- Maximiser le F_{sav}^{ECS} ($\epsilon = 0.005$)
- Maximiser le F_{sav}^{CH} ($\epsilon = 0.005$)
- Maximiser la $Prod_{PV}$ ($\epsilon = 5$)
- Minimiser la $Nombre_{PV}$ ($\epsilon = 0.1$)
- Contraint par $|Conso_{tot}| \leq 8 \text{ kWh}_{ep}/m^2$.

Une archive par ϵ -dominance est utilisée pour stocker les solutions optimales durant le processus afin d'améliorer à la fois l'exploitation et l'exploration, évitant ainsi de converger vers des optimums locaux. L'archive impose la définition d'un hyperplan formé par des hypercubes contenant une unique solution. Les dimensions de chaque hypercube sont définies suivant les valeurs d' ϵ respectives de chaque objectif. Il est important de rappeler que pour appartenir au même hypercube, deux solutions doivent obligatoirement avoir un écart sur chaque objectif inférieur à la valeur d' ϵ . Cependant l'hyperplan étant fixe, respecter ces conditions n'est pas suffisant, certaines solutions très similaires peuvent en effet se trouver respectivement sur les bornes inférieures et supérieures de deux hypercube adjacents. Dans ce cas, les deux solutions sont retenues car bien que très similaires, elles n'appartiennent pas au même hypercube et ne violent donc pas la contrainte d'unicité. Par contre, si la solution appartient au même hypercube alors seule la solution la plus optimale est retenue : la solution minimisant la distance normalisée au point idéal de l'hypercube. Pour les objectifs F_{sav}^{ECS} et de F_{sav}^{CH} , une taille de 0,5 % est retenue, indiquant que deux solutions ayant une différence de plus de 0,5 % sont forcément dans des hypercubes différents. Dans le cas de l'objectif $Prod_{PV}$, la valeur retenue n'est que peu importante car la variation de la production des capteurs PV est discrète et est directement liée au nombre de capteur PV ($Nombre_{PV}$). Dans les deux cas la valeur de l' ϵ est alors choisie inférieure au saut discret mais est arbitraire. Finalement l'algorithme est défini avec les paramètres suivants :

- $IT = 400$
- $NP = 90$
- $Max_{Echec} = 2 \times \text{nombre de variables de décisions} = 32$

IT est le nombre maximal d'itérations du processus de mise à jour des sources (III.4.7) : c'est le critère d'arrêt de l'algorithme. NP est la taille de la population (sources plus abeilles) et Max_{Echec} est le nombre maximal de variations consécutives que peut subir une source avant d'être abandonnée.

Dans cette configuration, l'algorithme réalise au minimum 36 090 évaluations ($NP * (IT + 1)$). Cependant le nombre **total** d'évaluations est aussi dépendant du paramètre Max_{Echec} qui permet d'éviter à la recherche de stagner. En effet l'abandon d'une source entraîne le tirage d'une nouvelle aléatoirement puis de sa position opposée. Ainsi si une source n'est pas améliorée au bout de 32 essais alors

elle est abandonnée et l'algorithme évalue donc une solution supplémentaire (position opposée) pour cette itération. Sur Bordeaux, 296 sources ont été abandonnées durant le processus d'optimisation contre 292 sur Strasbourg.

La partie suivante décrit l'évolution de l'optimisation au cours des itérations afin de montrer que l'algorithme converge bien vers un ensemble uniformément réparti de solutions.

IV.4.2 Évaluation de la progression de l'optimisation

L'évolution de l'optimisation est décrit par Fig. IV.11 à travers deux métriques : la *métrique S* aussi appelée hypervolume, et la métrique de *Schott*. Une augmentation de l'hypervolume traduit une meilleure convergence et couverture de l'espace des objectifs par l'ensemble des solutions. Une valeur proche de zéro pour la métrique de *Schott* indique que les solutions sont réparties uniformément dans le domaine des objectifs. Afin d'éviter les problèmes d'échelle, l'ensemble des solutions sont normalisées.

Dans les premières itérations (zone encadrée), les sources contiennent de nombreuses solutions ne respectant pas la contraintes. En effet, la majorité des combinaisons existantes ne permettent pas d'obtenir un bilan positif. Ainsi après l'initialisation (itération 0), le taux de faisabilité est très bas et les abeilles favorisent les solutions qui respectent la contrainte. Ce comportement se traduit par une augmentation très rapide du taux de faisabilité et de la taille de la population de l'archive dans les premières itérations. Ce comportement est aussi observable à travers la métrique d'hypervolume qui augmente rapidement. L'algorithme cherchant dans un premier temps à converger vers le front optimal, les solutions de l'archive ne sont pas uniformément réparties comme le montrent les variations de la métrique de *Schott*. Le front évoluant rapidement, les solutions sont rapidement remplacées par de nouvelles plus performantes et le niveau d'uniformité varie en particulier sur Bordeaux. Après 300 itérations, le front n'évolue plus, l'algorithme a couvert l'espace des objectifs uniformément.

Sur Bordeaux, il apparaît que la métrique d'hypervolume évolue par plateau. Si on observe l'évolution du taux de faisabilité, un schéma se dégage. Prenons comme point de référence le plateau qui démarre à la 155^{ème} itération. La qualité du front ne progresse que très peu dans un premier temps, les abeilles commencent alors à accepter des solutions ne respectant pas les contraintes. Ces solutions ne sont pas admissibles dans l'archive mais permettent d'offrir des combinaisons alternatives potentiellement prometteuses. Vers la 230^{ème} itération le taux de faisabilité remonte rapidement ; les abeilles ont réussi à profiter des nouvelles informations pour construire des solutions respectant les contraintes et les sources sont mises à jour. L'algorithme en acceptant d'explorer des combinaisons a priori non fructueuses a obtenu des informations supplémentaires qu'il a pu exploiter pour construire de nouvelles solutions admissibles. Ces nouvelles solutions sont ensuite ajoutées à l'archive améliorant la couverture du front optimal (amélioration de la métrique hypervolume). L'algorithme à ce stade de l'optimisation a en effet déjà convergé mais il est encore possible d'améliorer la couverture de l'espace des objectifs. L'exemple décrit ci-avant est aussi observable à plus petite échelle au sein même du plateau formé entre 155 et 260 itérations. Chaque petite progression du front est précédée par une réduction du taux de faisabilité (exploration) puis son augmentation (apprentissage). Sur Strasbourg, le schéma est plus difficilement discernable car la progression plus régulière.

Ainsi, l'algorithme converge rapidement en début d'optimisation puis se diversifie rapidement dans un premier temps, puis plus lentement pour finalement stagner après l'obtention d'un front de solutions optimales uniformément réparties. Dans la partie suivante, il est alors discuté des résultats obtenus pour Bordeaux comme pour Strasbourg.

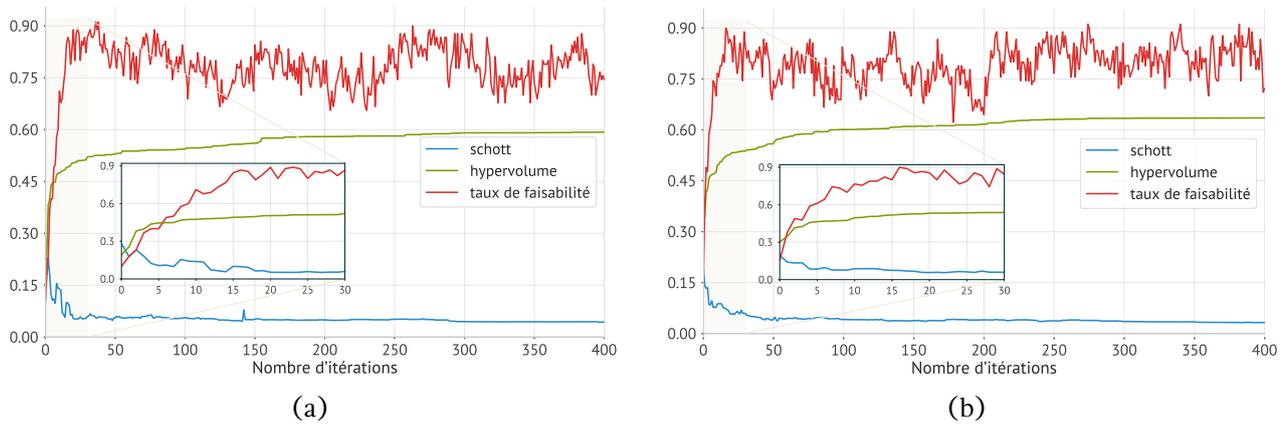


FIGURE IV.11 – Évolution de l’hypervolume et de la métrique de Schott durant le processus d’optimisation en fonction du nombre d’itérations pour Bordeaux (a) et Strasbourg (b).

IV.4.3 Qualité de l’approximation sur les fronts de Pareto

Afin de valider l’approche par méta-modèle, les solutions optimales obtenues pour Bordeaux et Strasbourg sont simulées avec le modèle original (Fig. IV.12). Comme pour les solutions de l’échantillon, les solutions optimales sont correctement approximées même si la dispersion des points est plus importante. Il est cependant observé que les modèles de substitution semblent sous-évaluer la valeur du modèle original pour tous les indicateurs en particulier sur Strasbourg pour l’indicateur $Conso_{app}^{CH}$. L’algorithme d’optimisation cherche en effet à minimiser ces trois indicateurs afin de pouvoir maximiser les objectifs F_{sav}^{ECS} et F_{sav}^{CH} . Ainsi en cherchant à trouver les solutions minimisant au maximum les indicateurs, les erreurs RMSE et MAE sont maximisées.

Le Tab. IV.7 montre que l’erreur moyenne quadratique augmente pour tous les indicateurs, en particulier pour l’indicateur $Conso_{app}^{CH}$. À l’exception de l’indicateur $Conso_{app}^{CH}$, les erreurs absolues varient peu par rapport à celle observée sur l’échantillon de validation, elles diminuent même sur Bordeaux pour l’indicateur $Conso_{app}^{ECS}$. Pour l’indicateur $Conso_{app}^{CH}$ sur Strasbourg, l’erreur maximale est par contre deux fois plus importante. Ce résultat était attendu au vu de la forme instabilité observée lors de l’évaluation de l’impact de la taille de l’échantillon (annexe, Fig. IV.9). Il avait en effet été montré que l’erreur absolue maximale reste importante même pour un échantillon de taille 2000.

L’erreur relative reste inférieure à 6 % sur Bordeaux et 5 % sur Strasbourg : les erreurs obtenues sont donc considérées comme acceptables et les modèles peuvent être utilisés pour analyser les résultats de l’optimisation.

TABLE IV.7 – Erreurs caractéristiques (RMSE et MAE) des méta-modèles sur l’échantillon de validation (gauche) et sur les solutions non-dominées obtenues par l’optimisation (droite) (kWh).

	Validation				Optimisation			
	Bordeaux		Strasbourg		Bordeaux		Strasbourg	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
$Conso_{app}^{CH}$	7,7	22,0	16,9	38,0	10,5	32,0	29,7	81,0
$Conso_{app}^{ECS}$	15,7	56,4	21,3	70,8	24,3	52,8	30,5	77,5
$Conso_{app}$	16,6	52,4	22,3	65,1	25,6	67,2	33,9	73,1

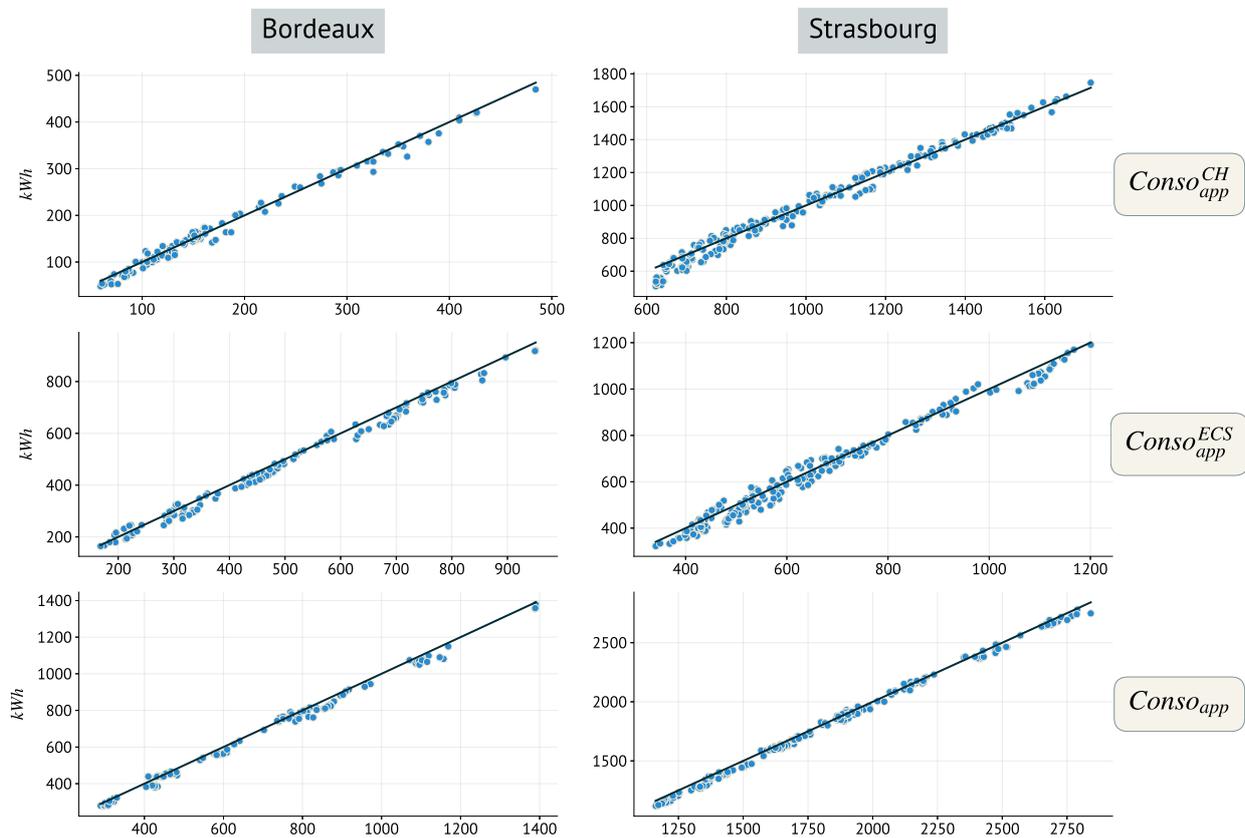


FIGURE IV.12 – Évolution des résultats obtenus par les méta-modèles (axes Y) et du modèle original (axes X) pour les solutions du front de Pareto. La ligne noire représente une approximation parfaite.

IV.4.4 Analyse globale des solutions non-dominées

Le front de Pareto obtenu comprend 120 solutions non-dominées sur Bordeaux (Fig. IV.13) contre 219 sur Strasbourg (Fig. IV.14). Dans les deux cas, il existe une large diversité sur les différents objectifs. Certaines solutions favorisent le solaire thermique, d'autres le photovoltaïque ou des combinaisons des deux. De plus, le fait de considérer la couverture du chauffage et de l'ECS de manière distincte permet de renforcer le nombre de compromis en proposant un plus grand nombre d'alternatives sur l'espace de décision. Le front pour le climat de Strasbourg est plus fourni que celui de Bordeaux en raison d'une plage de variation optimale plus importante sur le nombre de capteurs PV, augmentant le nombre de combinaisons possibles. La représentation des fronts est construite sous forme d'une matrice carrée. Les graphiques sur la partie inférieure représentent les projections deux à deux des objectifs : F_{sav}^{ECS} (%), F_{sav}^{CH} (%), et $Prod_{PV}$ (kWh). Les graphiques en partie supérieure décrivent eux aussi les projections deux à deux mais avec les axes x et y inversés permettant de mieux apprécier la distribution des solutions en fonction des différents objectifs. La couleur des points, décrit la répartition des solutions en fonction du dernier objectif : le nombre de capteurs PV. Finalement, chaque histogramme sur la diagonale décrit l'évolution et la répartition du nombre de capteurs PV en fonction des autres objectifs. Ces histogrammes sont particulièrement utiles lorsque le nombre de points est important afin de distinguer les tendances.

Les solutions devant toutes respecter un bilan positif, il existe un équilibre entre production d'énergie par les capteurs solaires thermiques et par les capteurs PV. Il est ainsi mis en évidence que sur Bordeaux, afin de réduire au maximum le nombre de capteurs PV, il est nécessaire d'avoir : $F_{sav}^{CH} > 57\%$ et $F_{sav}^{ECS} > 87\%$. Améliorer au delà la performance du système, sur le chauffage, ou, sur la production d'ECS, ne permet pas de réduire le nombre de capteurs PV. La consommation de l'appoint

est en effet déjà très faible et la production des capteurs PV est principalement utilisée pour couvrir les consommations électriques des équipements internes ($Conso_{usages}$). Sur Strasbourg une réduction supérieure à 38 % pour la consommation de chauffage, et de 84 % sur la production d'ECS, ne permet pas de réduire le nombre de capteurs PV nécessaires. Comme pour Bordeaux, le gain absolu sur la consommation n'est pas suffisant pour permettre de se passer d'un autre capteur PV. La production des capteurs PV admet en effet des sauts discrets car il a été retenu de faire varier non pas la surface de capteurs mais leur nombre afin de tenir compte de la géométrie de la toiture. Cependant pour un même nombre de capteurs installés, la production peut légèrement varier. La répartition des capteurs PV est en effet dépendante du nombre de capteurs solaires thermiques installés. Lorsque que le nombre réduit, il est possible de loger plus de capteurs PV sur le pan sud et donc d'améliorer la production.

Afin d'apprécier l'étendue du front de Pareto, les bornes de l'espace des objectifs, correspondant au point nadir et au point idéal sont disponibles dans le Tab. IV.8. Les valeurs renseignées sont donc les maximums ou minimums pour chaque indicateur, chaque ligne ne correspond pas à une solution existante mais à la combinaison des solutions maximisant ou minimisant un objectif en particulier. Sur Bordeaux, le SSC permet avec cinq capteurs de réduire de 90 % la consommation par rapport au cas de référence, soit une économie de 2572 kWh. À titre de comparaison, la meilleure solution avec seulement deux capteurs solaires thermique permet une économie de 2038 kWh. Ainsi l'écart entre les deux est peu important et deux capteurs permettent déjà d'obtenir un taux d'économie important : 76 % sur la production d'ECS et 31 % sur le chauffage. Sur Strasbourg avec sept capteurs, l'économie sur la consommation de l'appoint est de 3103 kWh ($F_{sav,ext} = 74\%$) contre 2009 kWh avec seulement deux capteurs. Il apparaît donc que même sur Strasbourg, le SSC permet avec peu de capteurs solaires d'obtenir de bon taux d'économie : 60 % sur la production d'ECS et 22 % sur le chauffage. Le SSC permet sur Strasbourg, d'économiser une part absolue plus importante, en particulier sur le chauffage ($Conso_{app}$). Sur Bordeaux la consommation de chauffage est en effet très faible et par conséquent améliorer le F_{sav}^{CH} impacte plus faiblement la consommation totale. Finalement, pour les deux climats, la plage de variation des taux d'économies sont similaires, le SSC est une alternative renouvelable adaptée à une large palette de conditions climatiques :

- $F_{sav,ext} : \sim 30\%$
- $F_{sav}^{ECS} : \sim 30\%$
- $F_{sav}^{CH} : \sim 60\%$

En effet bien que le $F_{sav,ext}$ soit moins important, l'économie sur l'appoint est plus important : le potentiel d'économie énergétique comme économique est donc supérieur sur Strasbourg.

TABLE IV.8 – Variation de la performance obtenue pour chaque indicateur en fonction du climat. Les consommations et productions sont exprimées en kWh.

	$F_{sav,ext}$	F_{sav}^{ECS}	F_{sav}^{CH}	$Conso_{app}$	$Conso_{app}^{ECS}$	$Conso_{app}^{CH}$	$Prod_{PV}$	Nbr_{PV}
Bordeaux								
Max	90	94	84	1379	921	470	4743	16
Min	57	64	22	278	164	48	3239	11
Strasbourg								
Max	74	89	62	2780	1191	1746	6021	24
Min	42	58	8	1118	322	508	4014	16

Pour les deux climats, une large diversité de solutions performantes sont obtenues. De plus, le potentiel du SSC semble plus élevé sur Strasbourg car les besoins en chauffage comme pour la pro-

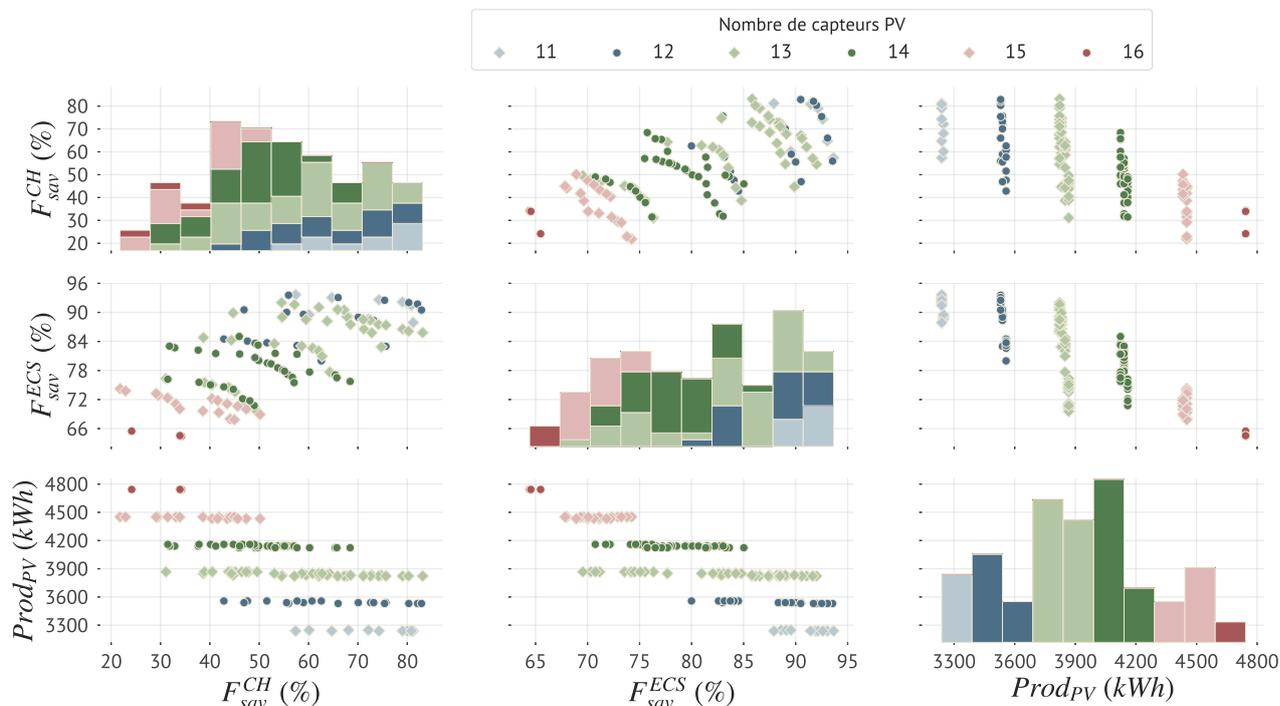


FIGURE IV.13 – Front de Pareto sur Bordeaux pour les quatre objectifs après 400 itérations. Chaque graphique est la projection des objectifs deux à deux. Le quatrième objectif, le nombre de capteurs PV, est décrit par la couleur des points.

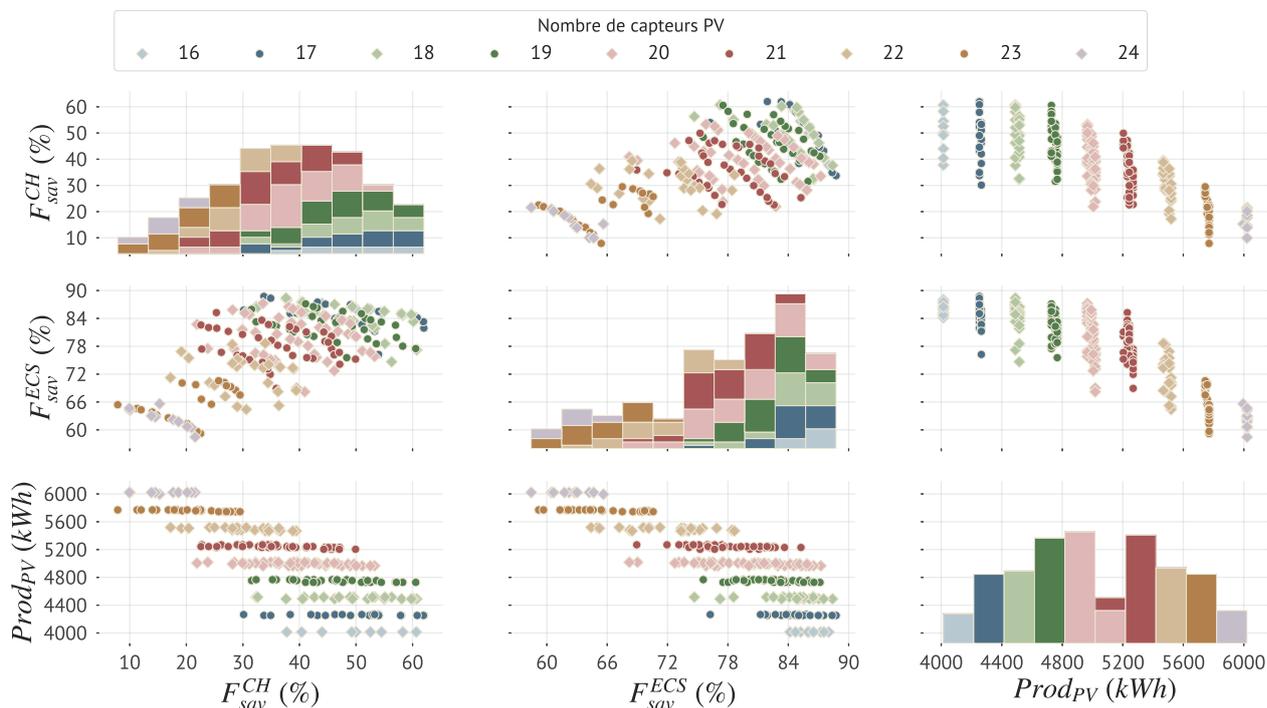


FIGURE IV.14 – Front de Pareto sur Strasbourg pour les quatre objectifs après 400 itérations. Chaque graphique est la projection des objectifs deux à deux. Le quatrième objectif, le nombre de capteurs PV, est décrit par la couleur des points.

duction d'ECS sont plus importants. Les parties suivantes analysent plus en détail le comportement du SSC avec dans un premier temps l'influence du nombre de capteurs photovoltaïques.

IV.4.5 Influence des capteurs photovoltaïques

Bien que la part relative maximale économisée ($F_{sav,ext}$) soit plus faible sur Strasbourg que sur Bordeaux, l'économie absolue en énergie ($Conso_{ref} - Conso_{app}$), est elle plus importante. De ce fait, le SSC permet de substituer un nombre plus important de capteurs PV. En effet la $Conso_{ref}$ pour le climat de Strasbourg est supérieure, autant sur le chauffage que sur la production d'ECS. De plus la variation de la performance de l'enveloppe entraine une variation de la $Conso_{ref}^{CH}$ de 400 kWh sur Bordeaux contre 750 kWh sur Strasbourg. Par extension, vu que l'optimisation est multi-objectifs, les solutions maximisant la surface de capteurs PV doivent produire plus sur Strasbourg afin de compenser l'énergie non économisée grâce au SSC. Ainsi la surface de capteurs PV maximale nécessaire est plus importante sur Strasbourg (24) que sur Bordeaux (16).

La borne inférieure est elle définie en fonction de deux éléments. Le premier est la consommation des usages spécifiques ($Conso_{usages}$), la valeur minimale que doit couvrir la production des capteurs PV. Celle-ci ne permet cependant pas d'expliquer pourquoi le nombre minimal de capteurs PV est plus important sur Strasbourg car la $Conso_{usages}$ est équivalente sur les deux climats. Le second élément est la performance du SSC, et plus particulièrement, la différence de consommation entre l'appoint et le système de référence ($Conso_{ref} - Conso_{app}$). Dans notre cas, le taux d'économie du SSC n'atteint pas 100 %, il est donc nécessaire pour atteindre un bilan positif, que la production des capteurs PV ($Prod_{PV}$) couvre aussi une part de la consommation de l'appoint. Ainsi, plus le SSC est performant, plus la part à couvrir par les capteurs PV diminue. Cependant, comme expliqué au paragraphe précédent, la consommation de référence est plus importante sur Strasbourg là où la performance relative du SSC est moins importante. Ainsi, le nombre minimal de capteurs PV est plus important sur Strasbourg.

Les résultats montrent aussi que le nombre de capteurs PV diminue lorsque la performance du SSC augmente. Afin de respecter la contrainte de bilan positif, la production solaire thermique augmente lorsque la production photovoltaïque diminue. Ainsi sur Strasbourg, augmenter le nombre de capteur thermiques de cinq ($11,6 m^2$) permet de réduire de huit ($13,1 m^2$) le nombre de capteurs PV nécessaires (Fig. IV.15b). Sur Bordeaux ajouter trois ($7,0 m^2$) capteurs thermique permet de réduire de cinq ($8,2 m^2$) le nombre de capteurs PV (Fig. IV.15a). De plus, la production des capteurs solaires thermiques est en adéquation avec la demande alors que le bilan *production / consommation* est réalisé à l'échelle annuelle pour le PV. Il est aussi mis en évidence que les solutions encadrées sont celles qui minimisent le nombre de capteurs PV sur la toiture. Contrairement aux solutions en dehors du cadre, elles ne couvrent pas l'ensemble de l'intervalle défini par la contrainte de bilan à énergie positive. Il n'existe ainsi pas de solution minimisant au maximum la $Conso_{tot}$ ($-304 kWh_{ef}$) et en même temps la surface minimale de capteurs PV.

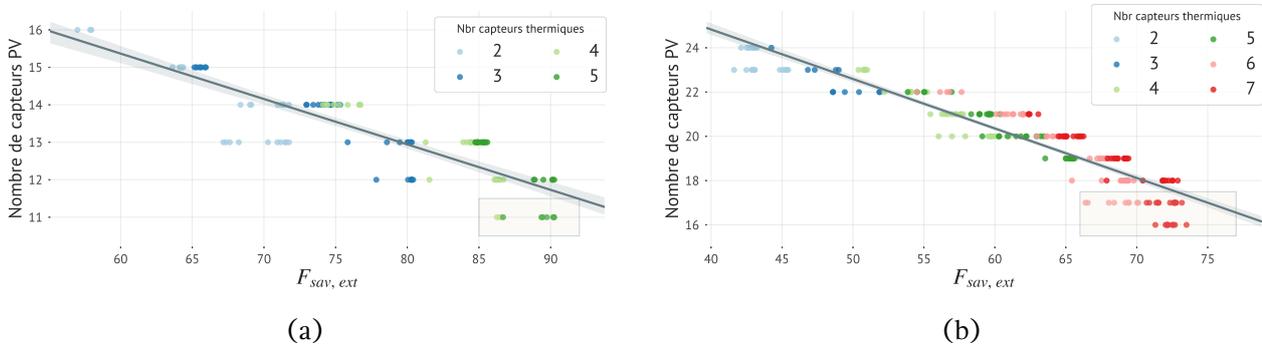


FIGURE IV.15 – Évolution de la performance globale du SSC en fonction du nombre de capteurs PV.

Les observations faites sur la variation du nombre de capteurs PV mettent en évidence que l'algorithme explore et trouve des solutions sur l'ensemble de l'espace des objectifs. De plus, augmenter la surface de capteurs solaires thermiques est plus intéressant que augmenter la surface de capteurs PV

en particulier sur Strasbourg. La partie suivante s'intéresse alors plus en détail à l'impact des capteurs solaires thermiques sur la performance du SSC.

IV.4.6 Influence des capteurs solaires thermiques

Le processus d'aide à la décision retenu implique dans un premier temps, la réalisation d'une optimisation multi-objectifs, puis grâce à une approche coordonnées paramétriques, le front est réduit de manière interactive afin de répondre aux critères du ou des décideurs. Cependant, cette approche comme toutes approches impliquant une optimisation contrainte à retenir uniquement les meilleures solutions. De ce fait, elle ne permet pas d'obtenir les solutions qui ne sont pas optimales au sens strict du terme mais qui ont une performance équivalente, peut être pour des combinaisons de paramètres plus intéressantes au regard d'objectifs non pris en compte dans l'optimisation. Ainsi, afin de pouvoir analyser l'influence du type de capteur sur la performance du système, il est nécessaire de chercher à évaluer la performance maximale pour chaque capteur suivant un processus d'optimisation indépendant. Profitant d'un temps d'évaluation très faible grâce aux modèles de substitution, une approche itérative exploratoire est donc retenue.

L'optimisation a été réalisée dans un premier temps en considérant l'ensemble des paramètres et montre une majorité écrasante de solutions avec un capteur sous-vide *SkyPro* (Fig. IV.16). La question qui se pose est donc de savoir si cette solution est retenue car elle apporte une amélioration de la performance importante, ou bien si son apport est marginal. Dans le premier cas, il est logique de favoriser ce type de capteur, mais dans le second cas, d'autres indicateurs sont nécessaires pour définir quel est le choix le plus pertinent.

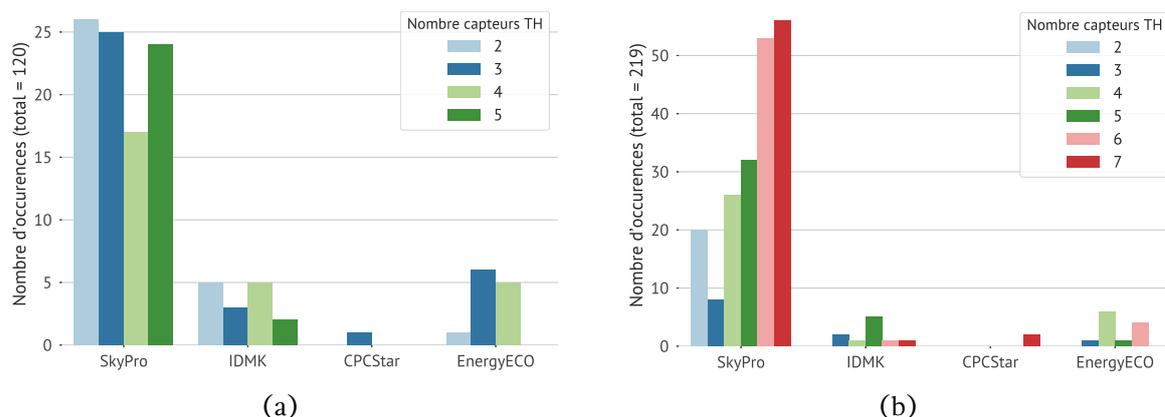


FIGURE IV.16 – Occurrences de chaque type de capteurs pour les solutions du front de Pareto en fonction du nombre installés pour Bordeaux (a) et Strasbourg (b).

Quatre optimisations successives pour le climat de Strasbourg sont donc réalisées et les fronts sont regroupés dans un archive commune. Cette archive ne considère pas de relation de dominance, l'ensemble des solutions sont conservées. Les résultats (Tab. IV.9) sont cohérents avec les proportions obtenues lorsque le type de capteur est une variable de décision. Le capteur *SkyPro* est en effet le plus performant devant le capteur *IDMK* mais l'écart de performance impacte que faiblement la $Conso_{app}$. Par contre pour le capteur *EnergyECO*, l'écart de performance est plus important : 170 kWh sur la $Conso_{app}$. Les valeurs entre parenthèses indiquent les maximums obtenus pour chaque objectif. Comme observé précédemment, le meilleur taux d'économie est obtenu par un compromis entre économie sur le chauffage et économie sur la production d'ECS. La production d'ECS étant plus importante et prioritaire, les solutions favorisant le $F_{sav,ext}$ admettent toutes un F_{sav}^{ECS} important. De plus peu importe le type de capteur, la meilleure performance est obtenue pour une consommation de référence similaire.

Comme explicité lors du choix des capteurs, les capteurs plans récents ont tous un rendement optique (η_0) important et de ce fait, le coefficient a_1 est le principal responsable des différences de performance. De plus, le capteur *SkyPro*, qui a pourtant le rendement optique (η_0) le moins élevé, permet au SSC d'obtenir le meilleur $F_{sav,ext}$. En effet, la surface considérée dans le calcul du rendement optique n'est pas la même. Pour le capteur *SkyPro* la surface utilisée est la surface totale soit $2,59 \text{ m}^2$. Pour les trois autres, la surface d'entrée est utilisée soit $2,32 \text{ m}^2$. Il est ainsi nécessaire de porter une attention particulière à la surface de référence considérée dans la fiche technique des capteurs.

TABLE IV.9 – Évolution de la performance maximale obtenue sur Strasbourg pour l'indicateur $F_{sav,ext}$ en fonction du type de capteur considéré. La valeur maximale de chaque objectif considéré est indiquée entre parenthèses. Les consommations sont exprimées en kWh.

	$F_{sav,ext}$	F_{sav}^{ECS}	F_{sav}^{CH}	$Conso_{app}$	$Conso_{ref}$	$Conso_{ref}^{ECS}$	$Conso_{ref}^{CH}$
SkyPro	74	86(89)	54 (62)	1133	4200	2866	1334
IDMK	72	85(87)	47 (60)	1166	4236	2866	1360
CPCStar	71	84(86)	46 (57)	1208	4200	2866	1334
EnergyEco	69	81(84)	51 (55)	1301	4220	2866	1354

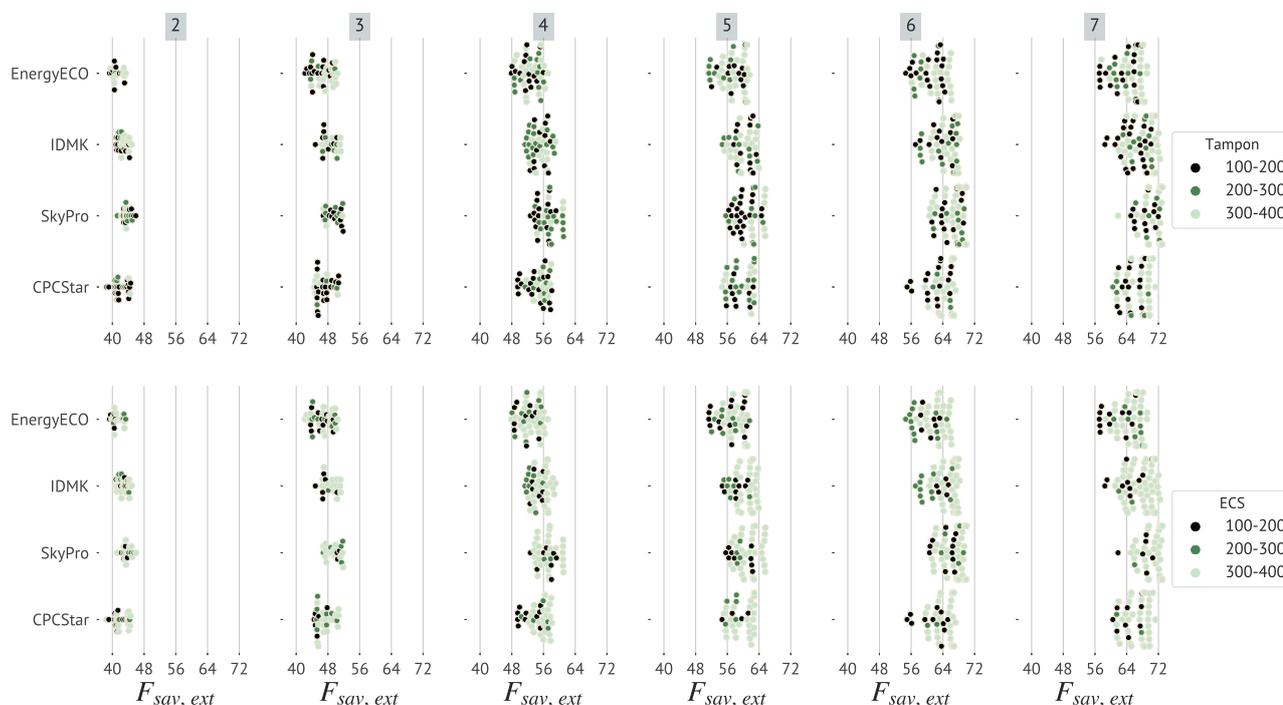


FIGURE IV.17 – Évolution de la performance du SSC sur Strasbourg pour l'indicateur $F_{sav,ext}$ en fonction du nombre de capteurs (chaque colonne), et du type de capteur (chaque lignes). La couleur indique respectivement, la taille du ballon tampon (figure du haut) et du ballon d'ECS (figure du bas).

Afin de mieux comprendre le comportement du SSC en fonction du type de capteurs, il est observé simultanément l'évolution de la performance globale ($F_{sav,ext}$) en fonction du nombre de capteurs solaires thermiques installés et des tailles respectives pour le ballon tampon et le ballon ECS (Fig. IV.17). Chaque point représente une solution optimale et chaque ligne correspond donc au front optimal obtenu pour chaque type de capteurs. Du bruit sur la verticale est ajouté afin de permettre d'identifier chaque point dans chaque groupe de solutions formées en fonction du nombre de capteurs solaires thermiques. Chaque type de capteurs étant une information qualitative, la variation de la hauteur des points n'apporte pas d'informations supplémentaires mais offre une meilleure lisibilité en permettant

d'identifier les sous- groupes formés par les différentes couleurs. Une graine aléatoire identique est utilisée pour les deux graphiques, la position des solutions est donc préservée d'une figure à l'autre. Finalement, puisque il existe de nombreuses variations possibles pour la taille des ballons, le choix a été fait de les regrouper en fonction de leurs tailles dans trois sous-groupes. Ainsi un ballon dont la taille varie de 100l à 200l inclus se trouvent dans le sous-groupe 100 – 200... Afin de simplifier la description des résultats, un volume allant de 100l à 200l sera aussi référencé comme étant *faible ou petit* alors que un volume supérieur à 300l sera considéré comme *important ou gros*.

Les résultats montrent qu'il existe pour Strasbourg, des solutions optimales pour tous les volumes de ballon tampon, indépendamment du nombre ou du type de capteurs solaires thermiques. De plus un $F_{sav,ext}$ important est obtenu pour des petits comme des gros volumes de ballon tampon. Il semble donc possible de retenir un volume de ballon tampon faible sans dégrader la performance globale du SSC. Par contre un volume de ballon ECS important permet d'obtenir la meilleure performance globale. Si on considère moins de cinq capteurs par contre le volume du ballon d'ECS est moins impactant. Aussi, même si des volumes importants sont favorisés, il existe des solutions très performantes avec des volumes peu important d'ECS. Ces solutions considèrent cependant un volume de ballon tampon plus important. Il semble donc qu'il soit possible de favoriser soit le chauffage, soit la production d'ECS pour obtenir un taux d'économie important. Ces résultats confirment les observations précédentes, un compromis est nécessaire entre la performance sur le chauffage et sur la production d'ECS.

Pour chaque nombre de capteurs installés, l'écart d'économie entre la valeur minimale et maximale augmente. Ainsi lorsque uniquement deux capteurs sont installés, $F_{sav,ext}$ varie de 38 % à 46 % alors que pour sept capteurs la variation est de 57 % à 74 %, soit une augmentation de 9 %. En effet à mesure que le nombre de capteurs augmente, la différence de performance entre les capteurs est accentuée. Ainsi l'écart entre la performance maximale pour le capteur *SkyPro* et le capteur *EnergyEco* est de 5 % lorsque sept capteurs sont installées contre 2,5 % pour seulement deux.

En considérant l'ensemble des solutions formées par les fronts optimaux pour chaque type de capteurs, il est possible d'évaluer l'influence du nombre de capteurs sur Strasbourg (Fig. IV.18). Chaque couleur représente un nombre de capteurs différent et chaque marqueur permet de mieux identifier les groupes de solutions. Comme pour les projections 2D des front précédents, la diagonale renseigne sur les proportions et la répartition de chaque nombre de capteurs.

Des solutions existent pour toutes les variations possibles du nombre de capteurs attestant d'une bonne représentativité de l'espace des objectifs. La production des capteurs PV varie aussi en fonction du nombre de capteurs solaires installées. En effet pour un même nombre de capteurs PV, la production varie faiblement (~100 kWh) car la toiture est partagée. La performance du SSC augmente à mesure que l'on augmente le nombre de capteurs et on note clairement un front pour chaque nombre installé. Par contre à mesure que l'on augmente le nombre de capteurs, la différence de performance avec le nombre précédent est moindre. En effet, les premiers ajouts de capteurs améliorent plus la qualité des solutions. Avec uniquement trois capteurs, seule la production d'ECS est couverte. Il est nécessaire d'installer au minimum quatre capteurs pour que le SSC récupère assez d'énergie solaire pour améliorer le F_{sav}^{CH} . À l'aide des histogrammes, il est aussi identifié que pour une même surface de capteur il est possible d'obtenir un F_{sav}^{ECS} et un F_{sav}^{CH} très variable. Sur le chauffage pour un même nombre de capteur le F_{sav}^{ECS} varie de 50 % et sur le F_{sav}^{CH} de 60 %.

La Fig. IV.19 permet de mieux apprécier l'évolution de la population sur Strasbourg en fonction du nombre de capteurs, pour respectivement, F_{sav}^{CH} , F_{sav}^{ECS} , et $F_{sav,ext}$. Ajouter un capteur permet d'améliorer le F_{sav}^{CH} de 8 % à 10 % jusqu'à six capteurs. Ajouter le 7^{ème} ne semble plus aussi efficace et permet uniquement une amélioration de 2,2 %. Sur l'indicateur F_{sav}^{ECS} l'amélioration est similaire de deux à cinq capteurs thermiques (6 % à 7 %) alors que au-delà, l'impact est moindre (3 %). Dans les deux cas la

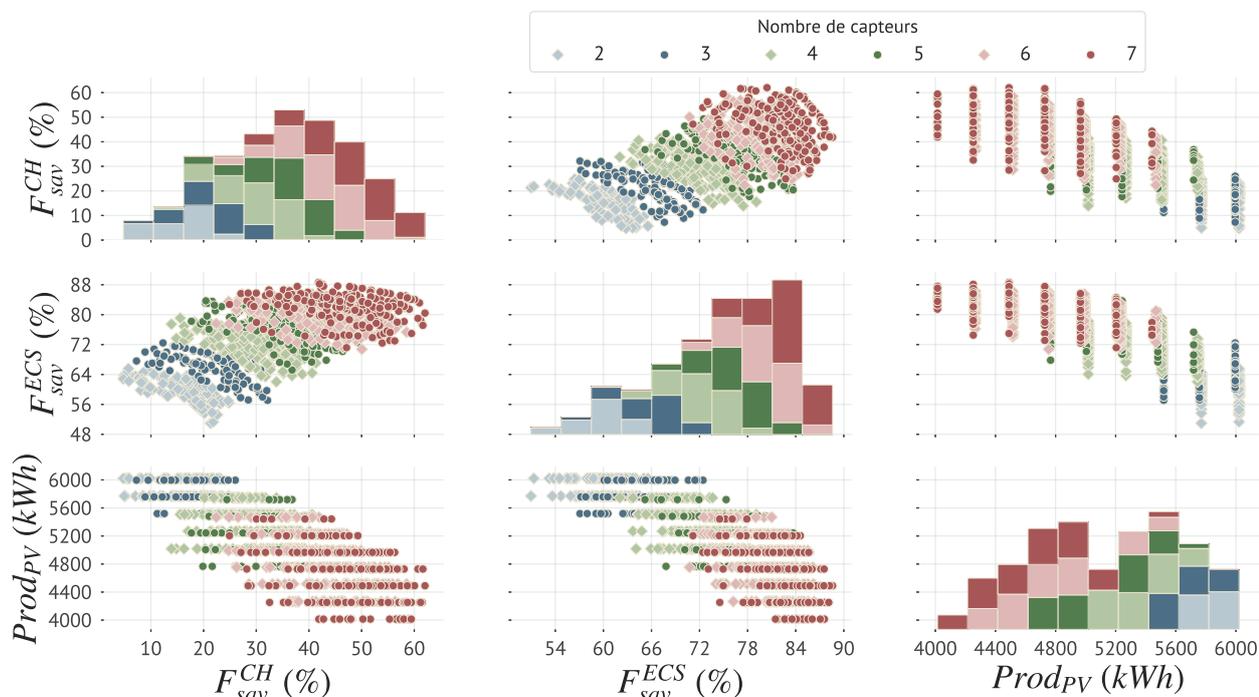


FIGURE IV.18 – Projection 2D des fronts de Pareto pour les différents types de capteurs sur Strasbourg. La couleur permet d’identifier le nombre de capteurs solaires thermiques installés.

meilleure progression est enregistrée lorsque l’on passe de trois à quatre capteurs solaires thermiques sur le chauffage comme la production d’ECS et marque aussi par extension la meilleure progression du $F_{sav,ext}$. L’analyse de la population en fonction de $F_{sav,ext}$ permet de montrer que le 7^{ème} capteur n’apporte qu’une faible amélioration (3 %) par rapport aux autres variations (5 % à 10 %). Cependant la distribution des solutions est plus importante pour six capteurs que pour sept. Il existe ainsi moins de combinaisons permettant au SSC d’atteindre une très bonne performance. Sur le F_{sav}^{ECS} uniquement, la dispersion augmente jusqu’à cinq capteurs puis se réduit alors qu’elle progresse sur le chauffage jusqu’à six capteurs. Ainsi sur Strasbourg il est pertinent de considérer uniquement six capteurs ce qui permet de réduire la consommation de l’appoint à 1251 kWh contre 4222 kWh sans solaire. Sur Bordeaux, installer quatre capteurs est suffisant et permet de réduire la consommation de l’appoint à 380 kWh pour une consommation de référence de 2856 kWh. Avec trois capteurs la consommation augmenterait de 180 kWh, alors que avec un 5^{ème} seulement 100 kWh seraient économisés.

Les résultats obtenus permettent donc de lever les conclusions suivantes :

- Le SSC obtient une bonne performance pour les différents types de capteurs.
- Il existe bien un écart de performance lorsque différents types de capteurs sont considérés mais il n’est pas déterminant.
- Le capteur sous-vide *SkyPro* est le plus performant mais le capteurs plan vitré *IDMK* obtient des performances similaires.
- Le capteur plan *EnergyEco* est le moins performant.
- Le SSC ne permet pas de maximiser la performance sur le chauffage et sur la production d’ECS, il est nécessaire de choisir sa préférence notamment en favorisant un volume important soit sur le tampon, soit sur le ballon d’ECS.
- Au delà de quatre capteurs pour Bordeaux et six capteurs pour Strasbourg, le gain énergétique est moins intéressant.

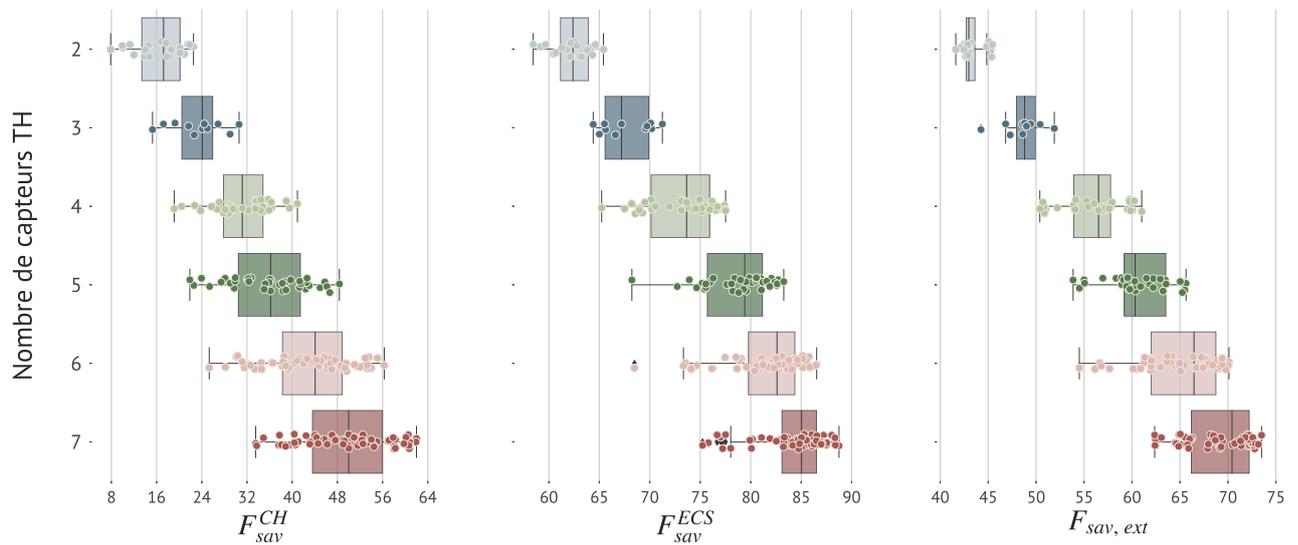


FIGURE IV.19 – Évolution de la performance du SSC sur Strasbourg en fonction du nombre de capteurs solaires thermiques. Le jeu de couleur est identique à celui utilisé dans Fig. IV.18.

Au regard des résultats, il apparaît donc intéressant de chercher à évaluer plus en détail l'impact du volume des ballons sur la performance du SSC. Cette analyse est donc réalisée dans la partie qui suit.

IV.4.7 Influence du volume des ballons

Au regard des résultats obtenus en faisant varier la taille des ballons (Fig. IV.20), il apparaît clairement que un volume important pour le ballon d'ECS est plus souvent retenue sur Strasbourg alors que pour le ballon tampon aucune préférence n'est observée. À l'inverse sur Bordeaux c'est un ballon tampon important qui est majoritairement retenu alors que la taille du ballon ECS est plus variable même si un volume supérieur à 300 l est majoritairement retenu. Un volume important pour le ballon tampon permet d'améliorer le F_{sav}^{CH} mais n'impacte que faiblement le $F_{sav,ext}$. Les consommations nécessaires pour couvrir les besoins en chauffage sur Bordeaux sont en effet faibles, ainsi améliorer l'efficacité du SSC sur le chauffage n'apporte pas de réduction importante sur la $Conso_{app}$. Il semble donc pertinent sur Bordeaux de considérer un volume de tampon inférieur à 100 l avec trois ou quatre capteurs (annexe, Fig. H.1). En effet la $Conso_{ref}$ varie seulement de 228 kWh à 620 kWh et les solutions optimales observées montrent que la $Conso_{app}$ varie elle de 48 kWh à 470 kWh. Ainsi le reste de cette section s'intéresse uniquement aux variations observées pour le climat de Strasbourg où le potentiel du solaire thermique pour le chauffage est plus important.

Afin d'évaluer l'impact de la taille des ballons, une nouvelle optimisation autorisant uniquement des volumes allant de 100 l à 200 l est réalisée. Les solutions optimales des deux fronts sont ensuite ajoutées dans une archive commune sans relation de dominance. L'archive contient ainsi les meilleures solutions avec de faibles volumes, et les meilleures solutions en laissant l'algorithme décider du volume optimal pour chaque ballon. Une fois obtenu, le front cumulé est évalué pour les indicateurs principaux du SSC en fonction du nombre de capteurs, du volume du ballon tampon, et du volume du ballon d'ECS (Fig. IV.21, annexe Fig. H.2). Si on considère séparément le chauffage et la production d'ECS, il apparaît que comme sur Bordeaux, le volume du ballon tampon est uniquement influent sur le F_{sav}^{CH} lorsque le nombre de capteurs solaires thermiques est faible (deux). Il est aussi clairement mis en évidence qu'opter pour des volumes faibles pour le ballon tampon et le ballon d'ECS permet d'obtenir des performances similaires. Par exemple pour sept capteurs, la SSC permet au maximum, de couvrir 62 %, et 89 % des consommations pour respectivement le chauffage

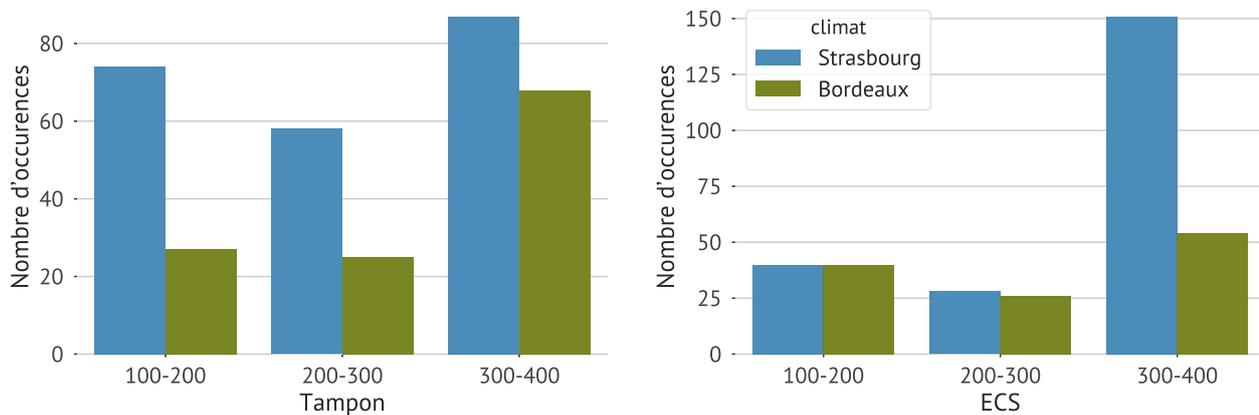


FIGURE IV.20 – Occurrences de chaque sous-groupe de taille de ballon pour les solutions du front de Pareto en fonction du nombre installés pour Bordeaux (vert) et Strasbourg (bleu).

et l'ECS. En limitant la variation du volume des ballons (100 l à 200 l) il est possible d'obtenir une performance similaire avec respectivement 56 % et 86 %. Comme le montre la figure, cette conclusion est valable quel que soit le nombre de capteurs solaires thermiques installés. Si maintenant, on considère la performance globale, alors l'écart sur la $Conso_{app}$ est de seulement 70 kWh. Le front uniquement composé des solutions obtenues pour de faibles volumes est disponible en annexe (Fig. H.3) où le volume exact est décrit par la couleur du point. Les résultats montrent qu'un volume minimal sur le tampon (100 l) et un volume de 150 l à 200 l pour le ballon d'ECS est suffisant sur Strasbourg. Utiliser un volume de ballon sanitaire plus petit ne permet pas en effet d'améliorer le F_{sol}^{CH} mais dégrade le F_{sol}^{ECS} . Il est aussi noté que lorsque le nombre de capteurs est faible, il est plus intéressant de considérer un volume faible pour les deux ballons. En effet, si il n'y a pas assez d'énergie solaire, la température du ballon tampon reste trop basse pour pouvoir être ensuite valorisée. Finalement, il est aussi observé que même pour une plage de variation réduite, le SSC est toujours capable de proposer des solutions maximisant soit le F_{sav}^{CH} , soit le F_{sav}^{ECS} .

Ainsi, au regard des résultats, il est plus intéressant de considérer des ballons de faible volume : pour Strasbourg, 100 l pour le tampon et 150 l à 200 l pour le ballon d'ECS. Ces résultats sont encourageants et invitent à repenser la conception d'un SSC pour les maisons à énergie positive. Un volume important présente en effet de nombreux inconvénients qui sont souvent un frein à l'adoption d'un tel système :

- Le ballon est l'équipement le plus onéreux d'un SSC.
- Un volume important réduit l'espace de vie disponible pour les occupants.
- Le volume étant plus important, les déperditions sont plus importantes :
 - Si dans un local chauffé, ces déperditions apportent des charges supplémentaires en période estivale.
 - Si installé dans un local non chauffé, les pertes sont plus importantes durant la période hivernale.

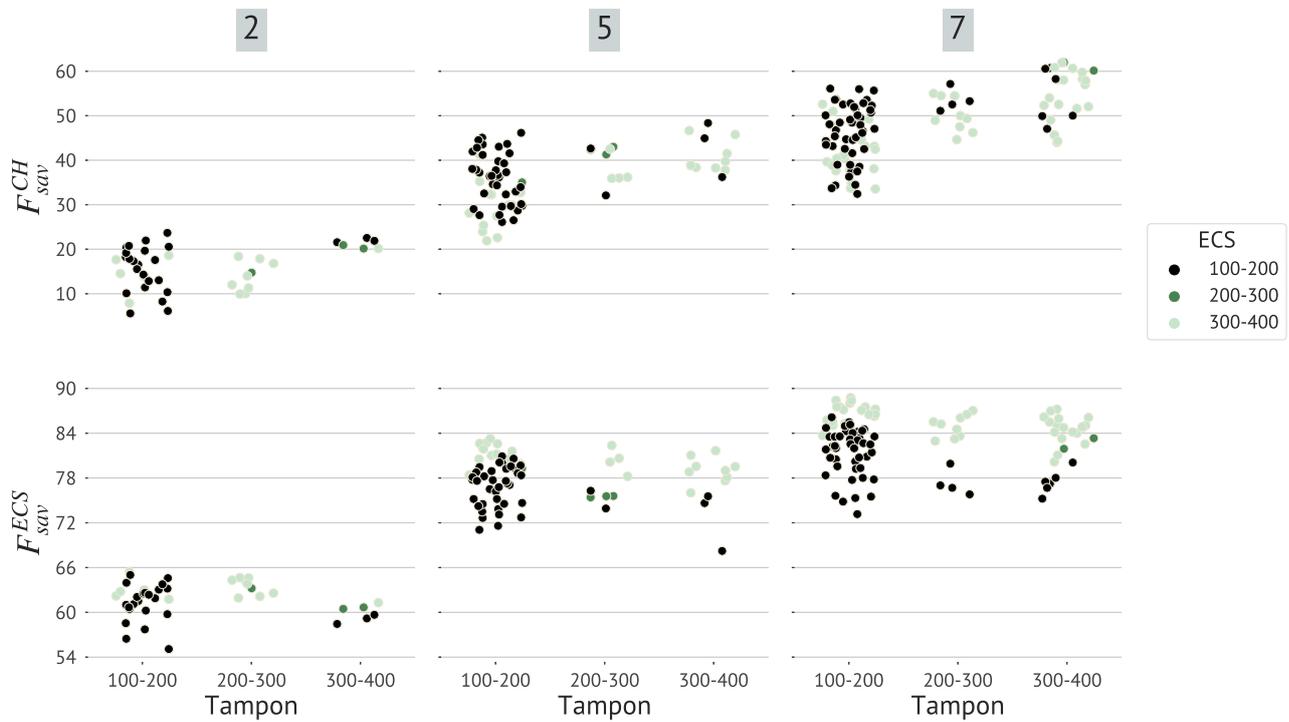


FIGURE IV.21 – Évolution de la performance du SSC sur Strasbourg pour les indicateurs F_{sav}^{CH} et F_{sav}^{ECS} en fonction du volume du ballon tampon (colonne) et du volume du ballon d’ECS (couleur).

IV.4.8 Influence des autres paramètres

Concernant l’algorithme de contrôle, une large variabilité dans les valeurs des critères de décision existe. Pour améliorer le F_{sav}^{CH} , il semble plus intéressant de retenir un $\Delta min_{capteur}$ et un Δmin_{tampon} faibles (0°C à 10°C). Augmenter le Δmin_{tampon} permet d’améliorer le F_{sav}^{ECS} mais dégrade le F_{sav}^{CH} et inversement. Concernant le $\Delta min_{capteur}$, les meilleures solutions sur l’indicateur F_{sav}^{ECS} admettent un $\Delta min_{capteur}$ important. Ce différentiel important permet de diriger une part plus importante du solaire vers la production d’ECS mais limite grandement la qualité de couverture du solaire pour le chauffage. En effet afin de renforcer l’économie sur le chauffage grâce au solaire, il apparaît que un $\Delta min_{capteur}$ faible est plus intéressant. Au niveau de la performance globale, du fait des compromis existants entre chauffage et production d’ECS, de nombreuses combinaisons sont possibles. Une tendance se dégage cependant pour le paramètre ΔT_{sol} . Obtenir la meilleure performance sur le chauffage nécessite un ΔT_{sol} très faible (5°C à 8°C) alors que pour maximiser la production d’ECS, il est plus opportun de considérer un ΔT_{sol} de 13°C à 15°C . Le meilleur compromis entre les deux permet de faire la meilleure économie sur l’ensemble des consommations (7°C à 12°C). Ces conclusions sont extraites de l’observation des tendances et il existe ainsi des solutions performantes en dehors des bornes proposées.

Concernant la position de l’échangeur dans le ballon sanitaire, il n’existe pas de position idéale. Une position basse tend à favoriser le F_{sav}^{ECS} ($0,8$ à 1) mais il reste possible d’obtenir un F_{sav}^{ECS} important ($\geq 85\%$) lorsque la position est plus haute (1 à $1,2$). Par contre si on considère uniquement des ballons de petites tailles, alors il est toujours plus intéressant de favoriser une position basse ($0,8$ à 1) que ce soit pour le F_{sav}^{ECS} ou pour le F_{sav}^{CH} . Les meilleures solutions sur l’indicateur F_{sav}^{CH} sont en effet pour une position de l’échangeur autour de $0,9$. Aucune relations ne sont identifiées entre la position de l’échangeur et les variables de décisions sur l’algorithme ($\Delta min_{capteur}$, Δmin_{tampon} , ΔT_{sol}).

Il a été montré que le SSC permet d’obtenir une très bonne performance sur les deux climats mais il est toujours nécessaire de faire une étude plus poussée afin de comprendre les corrélations existantes entre l’enveloppe et le SSC. La section suivante s’intéresse à cette question.

IV.4.9 Corrélation entre performance de l'enveloppe et SSC

Cette section s'intéresse aux corrélations existantes entre la performance de l'enveloppe et la performance du SSC. Dans un premier temps l'influence de la qualité de l'enveloppe est discuté globalement en fonction des indicateurs de performances relatifs, puis il est exploré les relations pouvant exister entre la $Conso_{ref}^{CH}$ (qui traduit la performance de l'enveloppe) et la performance du SSC.

Comme le montre Fig. IV.22, le meilleur taux d'économie est obtenu lorsque l'isolation du bâtiment est importante. La performance de l'enveloppe étant caractérisée par un coefficient d'échange global pour le bâtiment (U_{bat}) calculé en tenant compte de l'ensemble des surfaces déperditives. Pour le chauffage, il apparaît possible d'obtenir un taux d'économie important sans pour autant fortement isoler le bâtiment. Cependant, les meilleures solutions supposent une isolation importante. Maintenant si on regarde l'évolution couplée du F_{sav}^{ECS} et du $F_{sav,ext}$, la tendance n'est pas la même lorsque $F_{sav,ext} < 66$ et lorsque $F_{sav,ext} > 66$. Dans le premier cas, une enveloppe peu performante permet d'obtenir le meilleur $F_{sav,ext}$: il n'y a pas assez d'énergie solaire pour permettre d'optimiser à la fois le chauffage et la production d'ECS (qui est prioritaire). Dans le second cas, une enveloppe performante améliore le $F_{sav,ext}$. Ces solutions comportent six ou sept capteurs solaires thermiques et il est alors possible de couvrir une part importante sur la production d'ECS tout en ayant encore assez d'énergie pour couvrir les besoins sur le chauffage. Le solaire ne couvrant pas l'ensemble des besoins en ECS, réduire les besoins de chauffage permet de réduire la part solaire attribuée au chauffage, et donc de couvrir plus efficacement les besoins en ECS. Il est ainsi mis en évidence l'existence de nombreux compromis sur la qualité de l'enveloppe permettant tous d'obtenir un taux d'économie important favorisant tantôt le chauffage tantôt la production d'ECS.

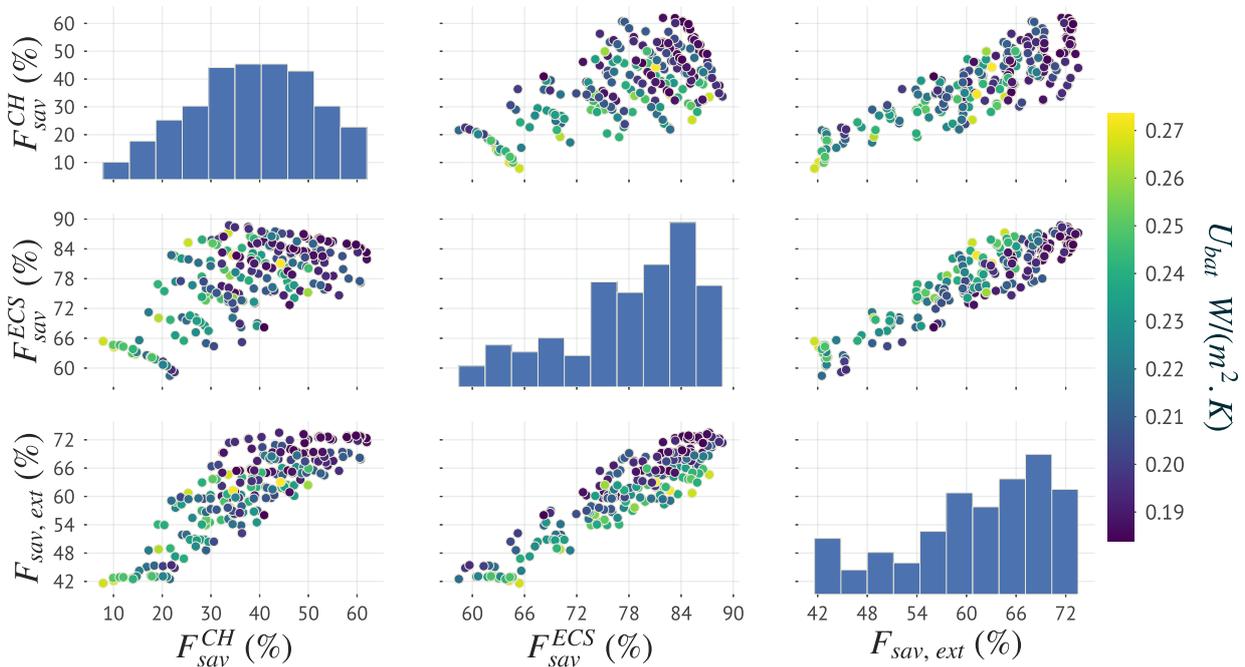


FIGURE IV.22 – Évolution de la performance du SSC sur Strasbourg pour les indicateurs F_{sav}^{CH} et F_{sav}^{ECS} , et $F_{sav,ext}$ en fonction de la performance de l'enveloppe (couleur).

Afin de mieux caractériser les corrélations existantes, trois indicateurs sont introduits, p , la probabilité qu'une corrélation existe entre deux variables mais aussi, les coefficients de corrélation de Pearson (*spearmanr*) et de Spearman (*pearsonr*). L'indicateur *pearsonr* permet d'évaluer le niveau de corrélation linéaire existant entre deux variables et *spearmanr* si il existe une relation monotone. La valeur est comprise entre -1 et 1 , où les extrêmes indiquent une corrélation totale et 0 qu'il n'en existe

pas. Le signe indique le sens d'évolution de la corrélation : une valeur positive indique que l'augmentation d'une des variables implique aussi l'augmentation de la seconde. Le second paramètre, p , indique la probabilité que le système ne soit pas corrélé du tout : 0 indiquant que le système est corrélé et 1 qu'il ne l'est pas.

L'analyse est uniquement réalisée sur Strasbourg car les besoins de chauffage sur Bordeaux sont très faibles et l'amélioration de l'indicateur F_{sav}^{CH} n'a que peu d'impact sur la $Conso_{app}$. L'analyse de la Fig. IV.23a montre qu'il existe une corrélation linéaire forte entre la consommation du système de référence ($Conso_{ref}^{CH}$) et la consommation de l'appoint sur le SSC ($Conso_{app}^{CH}$). Ainsi améliorer l'isolation du bâtiment semble permettre de réduire la $Conso_{app}^{CH}$. Maintenant si on cherche à évaluer la performance du SSC de manière globale, il est utile d'évaluer la relation existante entre : le taux d'économie en tenant compte de la consommation des pompes ($F_{sav,ext}$), et la qualité de l'enveloppe. Au regard des résultats (Fig. IV.23b), il apparaît que la corrélation n'est pas linéaire mais l'évolution peut être définie comme monotone ($spearmanr = -0,69$). Le système est donc en moyenne plus performant lorsque la qualité de l'enveloppe augmente. Ainsi, les solutions optimales considèrent majoritairement une enveloppe performante qui permet à la fois de réduire la $Conso_{app}^{CH}$ et augmenter le $F_{sav,ext}$. En améliorant l'enveloppe, les besoins sur le chauffage sont réduits et donc une part solaire plus importante peut être utilisée pour couvrir les besoins en ECS.

Il serait alors tentant de conclure que améliorer l'isolation au maximum est toujours une bonne idée, pourtant l'observation de la Fig. IV.23c permet de modérer cette conclusion. Il est en effet clairement mis en évidence qu'il n'existe pas de corrélation entre l'économie sur la consommation ($Conso_{ref}^{CH} - Conso_{app}^{CH}$) et la $Conso_{ref}^{CH}$. Ainsi sur le front de Pareto, il existe des solutions diverses et variées pour la même performance d'enveloppe. De plus il existe un saut (110 kWh) net lorsque l'économie est inférieure à 1550 kWh. Renforcer l'isolation au delà impacte ainsi négativement la performance du SSC au regard de l'économie absolue. Il semble donc qu'il existe un compromis entre la performance de l'enveloppe, la performance du SSC et l'économie absolue sur l'appoint. Cependant, retenir $Conso_{ref}^{CH} - Conso_{app}^{CH}$ comme objectif pour l'optimisation n'est pas non plus judicieux. Formulé ainsi, le front de Pareto comportera des solutions favorisant une enveloppe peu performante afin que le gain absolue potentiel soit plus important. On obtiendra donc des solutions maximisant F_{sav}^{ECS} (car $Conso_{ref}^{ECS}$ est fixe) mais aucunes ne favorisant F_{sav}^{CH} . Il est en effet plus intéressant de dégrader la performance de l'enveloppe si on cherche à augmenter l'économie d'énergie en valeur absolue.

En conclusion, le choix du niveau d'isolation doit bien être déterminé parallèlement au choix et au dimensionnement des équipements du SSC. Un autre indicateur doit être considéré afin d'arbitrer ce choix. Ce nouvel indicateur peut par exemple être le coût de l'installation, ou le temps de retour sur investissement. Cependant comme le montre la littérature, l'évaluation du coût est délicate car de nombreux facteurs doivent être pris en compte. La condition essentielle pour estimer correctement le coût de l'installation est de travailler en collaboration avec des industriels pour avoir une idée réaliste du coût des équipements, et avec des installateurs pour obtenir une indication quand au coût d'installation, en particulier le coût de la main d'œuvre. Celle-ci est en effet difficile à estimer et est souvent exprimée de manière approximative comme un simple ratio horaire. De même sur l'enveloppe, une intervention d'un expert est nécessaire afin d'évaluer le coût réel. Par exemple, il est souvent considéré pour l'isolant, un coût dépendant uniquement de son épaisseur. Cette approximation ne permet cependant pas de considérer le bâtiment dans son ensemble. En effet en fonction de la structure du bâtiment, des surcoûts importants peuvent survenir lorsque on passe d'une épaisseur à une autre de part les contraintes de support, de hauteur... Finalement, afin de calculer un temps de retour sur investissement, un nombre conséquent de facteur supplémentaires entre en jeu, le taux d'intérêt, l'inflation, l'évolution du coût des énergies, la valeur ajoutée au bâtiment ou valeur verte, la durée de vie des équipements, le coût de maintenance... Ainsi l'évaluation économique nécessite un large panel de connaissances afin de fournir des résultats pertinents. La difficulté inhérente à l'éva-

luation du coût est mis en avant par les résultats disparates obtenus dans la littérature amenant à des temps de retour variant de entre moins de 5 ans à plus de 100 ans. Dans le cadre d'une MEPOS, il est aussi possible de diriger son choix en tenant compte des résultats d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) ou bien du confort des occupants. L'utilisation de modèle de substitution permet en effet de simuler très rapidement un ensemble de solutions et ne nécessite pas de connaissances sur le modèle, ni le logiciel utilisé pour construire le modèle original. Ainsi de part sa modularité et bien que non traité dans ces travaux, l'ajout de nouveaux objectifs est simplifié.

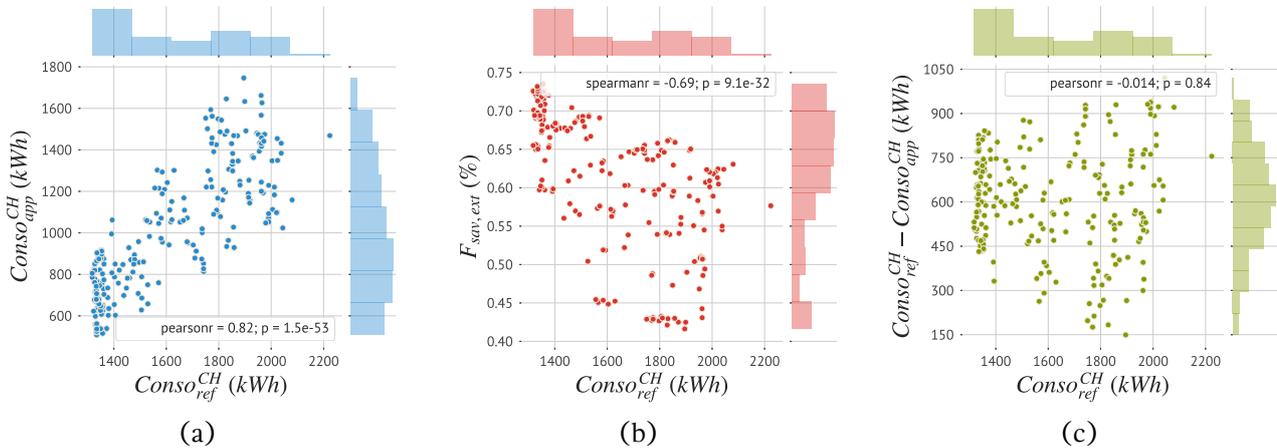


FIGURE IV.23 – Corrélations entre la qualité de l'enveloppe et la performance du SSC sur Strasbourg en fonction des indicateurs suivants : (a) $Conso_{app}^{CH}$, (b) $F_{sav,ext}$, (c) $Conso_{ref}^{CH} - Conso_{app}^{CH}$.

IV.4.10 Exploration du front de Pareto

Le processus d'aide à la décision interactif est la dernière étape de la méthodologie développée dans le chapitre III et permet d'aider à l'identification et au choix de solutions parmi celles du front de Pareto. Durant ce processus les objectifs ne sont pas forcément les mêmes que durant l'optimisation. En effet l'avantage d'une optimisation multi-objectifs réside dans sa capacité à explorer l'espace des objectifs afin de proposer de multiples combinaisons dans l'espace de décision sans introduire en amont de préférence. De cette manière, de nouvelles connaissances sur le problème peuvent émerger comme ce fut le cas dans ces travaux. Par contre durant le processus d'aide à la décision, les préférences du décideur doivent être introduites afin de réduire le nombre de solutions optimales. Ainsi l'aide à la décision revient à explorer de manière simultanée l'espace de décision et l'espace des objectifs. Cette section illustre l'utilisation du logiciel *Xdat*, un outil d'analyse par coordonnées parallèles qui permet comme décrit dans le chapitre précédent de bouger des curseurs pour chaque critère afin de réduire le nombre de solutions optimales. La méthode est appliquée sur Strasbourg en considérant le front commun formé par les optimisations avec et sans contraintes sur le volume des ballons.

Comme explicité ci-avant, les critères pouvant être retenus pour réaliser l'aide à la décision couvrent les critères de décisions, les objectifs, ou encore de nouvelles contraintes. Par exemple, il est possible de préférer certains matériaux afin de faire travailler des professionnels de la région. Dans le cas d'un constructeur de maisons individuelles, l'approche peut aussi permettre d'aider les clients à sélectionner une configuration parmi un catalogue de solutions (géométrie, qualité de l'enveloppe, système de chauffage...). L'optimisation est réalisée en amont permettant au constructeur de proposer une palette de solutions. Puis, grâce à une visualisation par coordonnées parallèles, le client participe de manière active aux choix constructifs comme aux choix des systèmes sans avoir besoin d'une expertise importante. Le client devient acteur de son choix et évalue mieux les contraintes et atouts de chaque proposition. Le constructeur lui, est mieux à même de présenter et défendre ces offres. Il existe bien sûr de nombreuses autres applications où l'approche par coordonnées parallèles est adaptée.

Dans cette dernière partie, la sélection des solutions optimales par application de la préférence de l'utilisateur est illustrée à travers Fig. IV.24 où chaque ajout de préférence fabrique un nouveau cluster identifiable par une couleur spécifique. Les solutions grises ne respectent aucune des contraintes et les autres couleurs répondent à un certain nombre des préférences comme explicité ci-après. Considérons le cas où le client souhaite minimiser la place prise par l'installation dans sa maison. En réduisant l'intervalle autorisé pour le volume des ballons à l'aide de leur curseurs respectifs, le front peut être réduit aux solutions ayant un volume inférieur à 200l (courbes bleues). Maintenant, il souhaite faire des économies sur l'isolation tout en limitant l'augmentation de la consommation électrique. Dans ce cas il est nécessaire de faire varier les curseurs sur les paramètres caractérisant l'enveloppe comme par exemple la résistance thermique des murs, puis, d'observer la performance des solutions restantes (courbes roses). À ce stade, l'ensemble des solutions nécessite une consommation électrique de 14 kWh/m²/an à 17 kWh/m²/an et une variation d'économie de 300 kWh/an est observée. Il est aussi noté que l'espace de décision est toujours diverse en particulier sur la qualité de l'enveloppe. Plusieurs choix sont ainsi possibles :

- Sélection d'une solution minimisant le nombre de capteurs (courbes rouges)
- Sélection d'une solution minimisant la qualité de l'enveloppe (courbes vertes)
- Sélection d'une solution résultant d'un compromis (courbes noires)

Afin d'évaluer les différences entre les différentes solutions, une solution est sélectionnée dans chaque groupe, auxquelles sont ajoutées les solutions maximisant les indicateurs principaux de l'étude ($F_{sav,ext}$, F_{sav}^{ECS} , F_{sav}^{CH} , $Prod_{sol}$), soit cinq autres solutions (deux maximisant $F_{sav,ext}$). Le détail des paramètres de décisions pour chaque solution est rapporté dans le Tab. IV.10 et chaque solution est présentée ci-dessous :

Solution 1 (S1) : Cette solution maximise le $F_{sav,ext}$. Elle représente le meilleur compromis entre la couverture du chauffage et de la production d'ECS tout en minimisant le nombre de capteurs PV. Elle admet une taille importante pour les deux ballons et le maximum de capteurs thermiques possibles. L'isolation est très importante afin de réduire au maximum les besoins sur le chauffage mais ne retient pas le meilleur vitrage existant.

Solution 2 (S2) : Cette solution maximise le F_{sav}^{ECS} et est très similaire à la solution 1. En cherchant à maximiser F_{sav}^{ECS} , la solution minimise F_{sav}^{CH} notamment avec l'utilisation d'un petit ballon tampon.

Solution 3 (S3) : Cette solution maximise le F_{sav}^{CH} . F_{sav}^{ECS} reste important pour deux raisons : la production d'ECS est prioritaire, et les besoins en ECS sont similaires durant l'année entière. À l'inverse de la solution 2, c'est cette fois le ballon sanitaire qui est réduit (200l). Cependant le volume minimal n'est pas atteint car le gain sur le chauffage est nul alors que la perte de performance sur l'ECS est par contre importante. C'est aussi la seule solution où l'échangeur est plus haut dans le ballon. En augmentant sa position, la production solaire sur l'ECS est réduite et une part plus importante peut donc être utilisée pour le chauffage.

Solution 4 (S4) : Cette solution correspond à la solution maximisant le $F_{sav,ext}$ lorsque la $Prod_{sol}$ est maximale. Il existe en effet de nombreuses solutions ayant exactement la même production par les capteurs PV car le nombre de capteurs est discret. Le SSC permet de couvrir près de 43 % avec seulement deux capteurs solaires thermiques mais l'économie de cinq capteurs thermiques nécessite l'ajout de huit capteurs PV supplémentaires. Enfin la production des capteurs n'est pas forcément en adéquation

avec la demande contrairement à l'appoint économisé par le SSC qui tient parfaitement compte de la temporalité des besoins.

Solution 5 (S5) : Cette solution maximise le $F_{sav,ext}$ lorsque le volume de chaque ballon est inférieur à 250 l. Mis en exergue dans IV.4.7, le volume des ballons peut être réduit tout en permettant de conserver une bonne performance globale.

Solution 6 (S6) : Représente une solution répondant aux préférences du décideur et qui admet uniquement cinq capteurs solaires thermiques.

Solution 7 (S7) : Représente une solution répondant aux préférences du décideur et qui admet une isolation minimale. Contrairement aux autres solutions la résistance thermique du plafond est fortement réduite.

Solution 8 (S8) : Représente une solution répondant aux préférences du décideur pour laquelle, un compromis entre performance de l'enveloppe et nombre de capteurs thermiques a été fait.

TABLE IV.10 – Détail des solutions optimales sélectionnée sur Strasbourg.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
SSC								
Nombre capteurs TH	7	7	7	2	7	5	7	6
Type capteurs TH					SkyPro			
Ech_{sol}^{pos}	0,8	0,96	1,23	0,95	0,94	0,92	0,89	0,96
Volume ballon tampon	400	100	400	250	200	150	150	100
Volume ballon ECS	400	400	200	350	200	200	200	200
ΔT_{sol}	5	10	8	10	10	26	18	11
$\Delta min_{capteur}$	30	28	0	8	16	0	2	29
Δmin_{tampon}	25	30	0	10	21	0	2	29
Enveloppe du bâtiment								
R murs	7	7	7	4	7	6	6	6
R plafond	10	10	10	9,5	10	10	6	10
R plancher	8,5	8,5	10	10	9	6	6,5	7,5
Surface vitrée sud	5,8	6,6	6,2	5,4	6,2	7,3	6,6	7,3
Surface vitrée est	4,3	4,7	4,3	4,7	4,4	4,5	4,8	4,3
Type de vitrage	PlanithermXN		PlanithermOne		PlanithermXN		PlanithermOne	
Production d'électricité								
Nombre capteurs PV	16	17	18	24	16	20	20	18
Indicateurs								
$Conso_{app}$	1118	1208	1233	2667	1217	1645	1629	1473
$Conso_{ref}$	4221	4219	4187	4726	4208	4350	4722	4308
$Conso_{app,diff}$	3103	3011	2954	2059	2990	2704	3092	2835
$F_{sav,ext}$	74	71	70	43	71	62	65	66
F_{sav}^{ECS}	87	89	80	61	84	79	82	83
F_{sav}^{CH}	44	34	62	18	45	33	43	34
$Prod_{PV}$	4014	4252	4490	6021	4014	5005	4966	4516

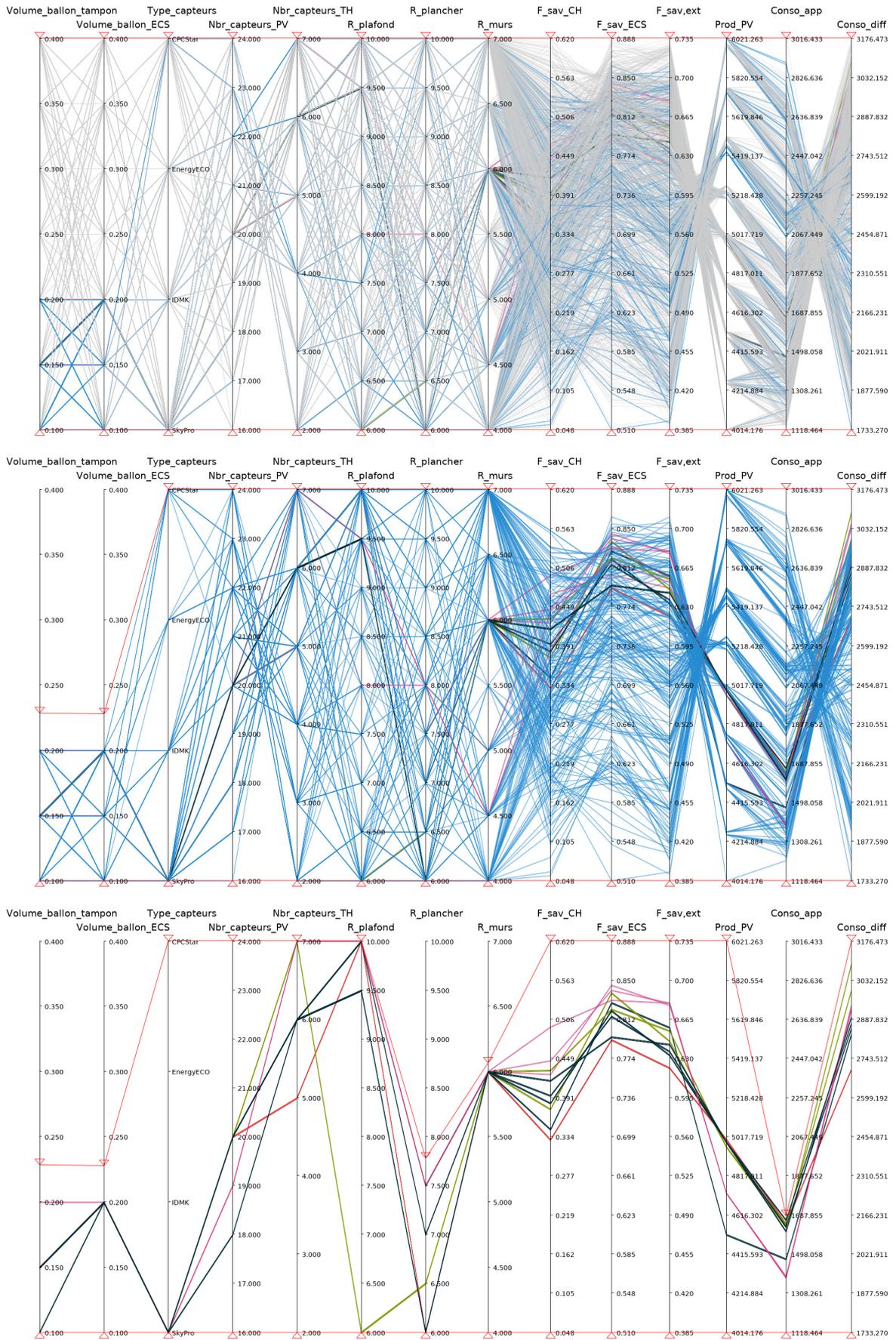


FIGURE IV.24 – Évolution de l'aide à la décision en fonction de choix fictifs d'un décideur. Les courbes grisées ne répondent à aucune contraintes du décideur. Chaque autre couleur indique par contre le respect d'une ou plusieurs contraintes.

IV.5 Bilan

Une approche exploratoire par optimisation multi-objectifs s'est montrée être pertinente à la fois pour évaluer les interactions existantes mais aussi pour proposer un large choix de solutions optimales. Il est en effet mis en exergue une large diversité des paramètres de décision traduisant une bonne exploration de l'algorithme. Cependant l'approche introduit un élitisme important sur certains critères de décision en partie car tous les objectifs ne sont pas antinomiques. Il a donc été proposé un processus itératif d'aide à la décision. Dans un premier temps l'optimisation est réalisée en considérant l'ensemble des critères de décisions, puis en fonction des résultats de la première optimisation, certains critères de décision sont fixés ou la plage de variation réduite. Le processus d'optimisation est alors relancé et les solutions optimales ajoutées dans une archive commune. Cette méthode a permis d'identifier des compromis similaires aux solutions optimales mais proposant de nouvelles combinaisons sur l'espace de décisions. Ce processus permet ainsi d'affiner la recherche afin de proposer un ensemble de solutions optimales à la fois par rapport aux objectifs mais aussi aux contraintes propres du ou des décideurs. Elle reste de plus adaptée pour des applications où les objectifs sont tous antinomiques. En effet la complexité augmente rapidement avec le nombre d'objectifs considérés et la littérature montre que l'efficacité des méta-heuristiques diminue à mesure que le nombre d'objectifs augmente. L'aide à la décision par coordonnées parallèles s'est aussi montrée pertinente et simple d'utilisation. Elle permet de rapidement sélectionner une solution sans forcément avoir une connaissance approfondie du modèle. Elle est ainsi adaptée au secteur du bâtiment afin de permettre à chaque acteur de participer aux décisions et de regrouper l'expertise des différents acteurs du bâtiment. De plus l'ajout d'un objectif ou d'une contrainte étant trivial, elle permet aussi de tenir compte des contraintes de chaque corps de métiers.

Des résultats encourageants pour le développement de SSC pour les maisons à énergie positives ont aussi été identifiés. Afin d'obtenir la meilleure performance globale ($F_{sav,ext}$), il est nécessaire de trouver le bon équilibre entre couverture solaire du chauffage et de la production d'ECS, car maximiser l'un des deux ne permet jamais d'obtenir la meilleure économie. Il est aussi possible d'obtenir une performance équivalente pour différentes tailles de ballons. En plus de libérer une place conséquente, l'utilisation de ballons de faible volume permet de réduire les coûts d'installations comme de maintenance tout en limitant les risques de surchauffes estivales. Ces résultats marquent ainsi une avancée importante pour le développement de SSC pour les maisons individuelles où la place disponible est limitée tant sur le plan énergétique que économique. Aussi, un compromis entre qualité de l'enveloppe et performance du SSC est identifié, le choix restant propre aux contraintes du décideur : sur-isoler et réduire le nombre de capteurs, ou moins isoler et augmenter le nombre de capteurs. Concernant les capteurs, le choix du type reste peu influent tant que le capteur est récent. Finalement, au delà de quatre capteurs sur Bordeaux et de six sur Strasbourg le gain potentiel est moins important.

La méthodologie développée a mis en évidence l'existence de nombreuses solutions prometteuses et invite à repenser les choix de conception lors du développement de SSC couplés à des MEPOS.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette thèse s'est intéressée aux MEPOS solaires et en particulier au développement d'une méthodologie multi-objectifs permettant d'accompagner les concepteurs pour le dimensionnement de SSC couplés à des MEPOS. Le choix de considérer le bâtiment, le SSC et son algorithme de contrôle comme un ensemble cohérent et fonctionnant de concert a été fait. S'inspirant de la norme PREN 15603 et basée sur une aide à la décision a posteriori, la méthodologie s'est montrée pertinente à la fois pour évaluer les interactions existantes mais aussi pour proposer un large choix de solutions optimales. Parmi ces solutions, des compromis intéressants ont été identifiés invitant à repenser les choix de conception lors du développement de SSC couplés à des MEPOS.

À travers ces travaux, il a été mis en avant que la construction d'une MEPOS est un problème multi-objectifs complexe faisant intervenir de nombreux critères. Il n'existe cependant pas à l'heure actuelle une définition précise en France, même si un cadre européen se construit à travers la norme PREN 15603. Cette norme invite à la sobriété énergétique en favorisant l'utilisation des énergies renouvelables sur site pour de l'auto-consommation, le but étant de limiter la production électrique directement injectée dans le réseau afin d'éviter des aberrations écologiques. De par sa simplicité, le solaire thermique et par extension le SSC est un candidat approprié pour couvrir une part importante des besoins en adéquation avec la demande. Pourtant cette technologie n'est que peu utilisée pour la constructions de BEPOS, et il n'existe pas de travaux cherchant à caractériser le potentiel d'un tel couplage en tenant compte à la fois, de l'enveloppe, du système, et de l'algorithme de contrôle. Partant de ce constat, un regard neuf est proposé dans ce document et invite à repenser la conception des SSC pour les MEPOS avec une attention particulière sur les points suivants :

- La conception est un processus complexe, la méthodologie se doit d'être relativement simple à mettre en place afin d'être applicable.
- La logique de contrôle doit faire partie du processus de décision.
- La conception d'une MEPOS solaire doit être le résultat d'un compromis entre qualité de l'enveloppe et performance du SSC.
- L'évaluation du SSC doit tenir compte de l'adéquation entre production et demande suivant un bilan importation / exportation.
- La taille des équipements du SSC doit être réduite afin d'être viable économiquement.

Ainsi fort de l'expérience acquise à travers l'analyse de l'état de l'art et des tendances observées au niveau industriel, un bâtiment couplé à un SSC a été dans un premier temps modélisé et les principaux composants validés analytiquement. Le langage *Modelica* et le logiciel *Dymola* ont été retenus car ils sont particulièrement adaptés au processus de développement itératif nécessaire pour cette application. Pour le bâtiment, un modèle mono-zone a été sélectionné après une comparaison avec une approche multi-zone sous *EnergyPlus*. Concernant le SSC, le système développé utilise l'air comme vecteur de chaleur afin d'améliorer la réactivité du bâtiment et éviter l'installation d'un système de chauffage conventionnel. De plus, une modélisation détaillée est retenue afin de pouvoir contrôler l'ensemble des facteurs influents que ce soit sur les caractéristiques du système ou sur les paramètres de la logique de contrôle. Ce choix a permis d'affiner l'algorithme de contrôle afin de favoriser la part

solaire. Les premiers résultats sont obtenus en suivant la méthodologie couramment utilisée dans les bureaux d'études, à savoir une approche paramétrique où chaque évaluation est réalisée à partir de l'expérience acquise en amont et où la performance de l'enveloppe est fixée. Bien que les résultats aient permis d'identifier le potentiel du dimensionnement couplé d'une MEPOS et d'un SSC, l'approche ne permet pas d'évaluer de manière complète le domaine de définition et donc de caractériser la performance pouvant être attendue. Il est cependant mis en avant un comportement caractéristique du système étudié : le SSC développé est capable de répartir l'énergie solaire disponible en fonction des caractéristiques des équipements retenus pour réduire la consommation de l'appoint, soit sur l'ECS, soit sur le chauffage, sans modifier la couverture solaire au niveau global.

Une fois le potentiel du SSC identifié et les limites de l'approche paramétrique mises en exergue, il est proposé une méthodologie plus adaptée permettant d'accompagner le concepteur dans son choix à travers trois étapes :

- Réduire la complexité du problème ainsi que le temps nécessaire pour une évaluation.
- Explorer l'espace de décision grâce à processus automatisé afin d'obtenir un large choix de solutions optimales pour un temps court.
- Accompagner le concepteur dans le choix de la solution la plus adaptée de manière simple et interactive.

Au cours de la première étape, la méthode de *Morris* permet de sélectionner uniquement les critères de décision les plus influents grâce à un tri qualitatif. Suit la création d'un modèle de substitution par la méthode du chaos polynomial afin de réduire fortement le temps de calcul nécessaire pour chaque évaluation et permettre de créer un modèle faisant abstraction de la complexité du modèle original. Cette approche s'est montrée particulièrement adaptée pour le modèle développé dans ces travaux où le temps de simulation initial était un facteur limitant. Afin d'explorer le domaine de décision, une approche d'aide à la décision a posteriori est choisie afin de ne pas introduire de caractères préférentiels. Celle-ci nécessite dans un premier temps la réalisation d'une optimisation multi-objectifs pour obtenir un ensemble de solutions optimales. Après une analyse de la littérature et toujours dans l'optique de proposer une approche simplifiée, une méta-heuristique basée sur le comportement des abeilles mellifères (ABC) est retenue pour l'optimisation principalement car elle nécessite la détermination de seulement trois paramètres. Puis en tenant compte des observations de la littérature, l'approche est améliorée afin d'offrir un bon équilibre entre exploration et exploitation sans sacrifier pour autant la simplicité d'utilisation. L'implémentation est réalisée en *Python*. Finalement, la dernière étape consiste à assister le ou les décideurs dans le choix de la solution la plus adaptée. Dans ces travaux, le choix a été fait d'utiliser une approche interactive simple afin que chaque intervenant puisse participer et être acteur de sa décision.

La méthodologie développée est finalement illustrée à travers l'étude de deux cas d'études, Bordeaux avec un climat propice, et Strasbourg où le climat est plus rude durant la période hivernale. L'évaluation est réalisée en faisant varier de manière concomitante les paramètres caractéristiques de l'enveloppe du SSC et de sa logique de contrôle. La définition de la MEPOS intègre ici les consommations internes (équipements domestiques et éclairage) et les consommations propres à la couverture des besoins pour la production d'ECS et du chauffage. Ainsi, la toiture est partagée entre des capteurs photovoltaïques et des capteurs solaires thermiques en tenant compte de la géométrie triangulaire caractéristique d'une toiture quatre pans afin de couvrir les besoins électriques et thermiques. L'approche s'est montrée particulièrement pertinente à la fois pour évaluer les interactions existantes mais aussi pour proposer un large choix de solutions optimales. Des solutions diverses permettant toutes d'obtenir un bilan nul ou positif ont été trouvées, soit en favorisant une surface importante de capteurs PV, soit en favorisant la production du SSC. Au regard des résultats, l'utilisation d'un SSC est

plus pertinente dans un climat rude comme sur Strasbourg où les besoins en chauffage restent élevés malgré une isolation importante. Pour des conditions similaires à celles de Bordeaux, les besoins en chauffage sont en effet limités et même si l'économie relative est plus importante, l'économie absolue reste plus faible. Aussi, l'identification d'un compromis entre qualité de l'enveloppe et investissement sur le SSC confirme l'hypothèse initiée dans le premier chapitre : la construction d'une MEPOS solaire doit être le fruit du dimensionnement couplé du bâtiment avec le système solaire afin de tenir compte des interactions. Une fois les résultats de la première optimisation analysés, l'introduction de préférence est illustrée à travers une optimisation itérative qui consiste à relancer le processus d'optimisation en ajoutant une ou plusieurs contraintes supplémentaires. Cette approche a permis d'identifier des solutions similaires pour des volumes de ballons très faibles, ou encore pour une surface de capteur réduite. Ainsi contrairement aux premiers résultats obtenus par une approche paramétrique, l'exploration sans préférence a priori a permis d'identifier des solutions encourageantes pour le développement de MEPOS solaires. En effet, en plus de libérer une place conséquente, réduire la taille des ballons permet de limiter les risques de surchauffes mais surtout de limiter le coût d'investissement. Finalement l'ajout du caractère préférentiel est illustré à travers une représentation des solutions par coordonnées parallèles permettant de mettre en avant la praticité de la méthodologie développée.

Ces travaux ont mis en évidence la pertinence du choix du solaire thermique pour le développement de MEPOS ainsi que la diversité des solutions pouvant être obtenues. Cependant, certaines hypothèses, notamment le choix des scénarios réglementaires pour caractériser le comportement des occupants peuvent être questionnées. En effet la place des occupants est un facteur important lors de l'évaluation de la performance des MEPOS. Il serait donc intéressant d'incorporer dans la méthodologie la prise en compte de scénarios stochastiques (VORGER 2014). Comme explicité dès le second chapitre, les observations faites au cours de cette thèse nécessitent aussi d'être confrontées aux résultats d'une expérimentation à échelle 1. En effet même si les composants du modèle ont fait, pour la plupart, l'objet d'une vérification analytique, le modèle dans son ensemble nécessite d'être validé expérimentalement afin de corroborer les conclusions de ces travaux. Il est alors nécessaire de vérifier que le modèle traduit correctement le comportement du SSC dans des conditions réelles. En plus de la validation, il serait aussi intéressant d'évaluer les risques de surchauffe et de caractériser les méthodes existantes pour évacuer la chaleur, soit en la valorisant pour une autre application comme pour le chauffage d'une piscine, soit en déchargeant l'énergie excédentaire, par exemple, en faisant circuler l'eau du SSC dans les capteurs solaires en période nocturne.

Ces travaux ont aussi contribué au développement d'une méthodologie d'aide à la décision qui a l'avantage d'être assez générique pour permettre l'ajout de critères ou contraintes supplémentaires. Afin de compléter l'étude et comme mis en avant au cours du dernier chapitre, il est nécessaire d'ajouter des modèles de coût (coût d'investissement, temps de retour...). Il est cependant nécessaire de rester très prudent quant à leur implémentation en particulier pour le temps de retour sur investissement qui doit tenir compte de la complexité inhérente à ce type d'analyses comme explicité à travers le chapitre précédent. De plus, comme noté à travers le premier chapitre, les résultats obtenus sont fortement dépendants des données météo utilisées. Le rayonnement solaire en particulier est très changeant d'une année à l'autre, il serait alors pertinent d'évaluer la variation de la performance du SSC pour une période étendue de simulation. Cette analyse peut être réalisée avec l'aide de données météorologiques existantes mais une étude prospective sur l'évolution du climat futur est plus profitable. En effet afin d'être complète, l'analyse du retour sur investissement doit tenir compte de l'évolution du coût des énergies, mais aussi, des besoins du bâtiment qui sont en partie liés à l'évolution du climat. Il apparaît ainsi judicieux de coupler la construction de fichiers météorologiques prospectifs à la construction de scénarios économiques. Il est alors possible de quantifier le potentiel énergétique et économique du SSC pour différents scénarios, tout en tenant compte du vieillissement

des équipements. Afin de répondre à ces perspectives, il peut être envisagé un couplage entre la méthodologie développée dans ce manuscrit et une approche par clustering. Chaque année serait alors représentée par un jeu de semaines typiques permettant de limiter le temps de simulation nécessaire. Aussi ces travaux ont fait le choix de retenir l'air comme moyen d'émission mais la méthodologie est tout à fait transférable à d'autres familles de systèmes. La robustesse de la méthodologie développée peut aussi être améliorée en ajoutant la prise en compte des incertitudes. Afin de l'intégrer durant le processus de prise de décision il est alors nécessaire d'avoir recours à des méthodes de propagation d'incertitudes.

Finalement, l'outil actuel n'est pas directement transférable pour une application en bureau d'études. Afin d'être opérationnel, il est nécessaire de développer une interface ergonomique ajoutant une couche d'abstraction entre la complexité des moyens nécessaires mis en place et le but de la méthodologie.

Dans la continuité de ces travaux, deux axes principaux sont identifiés : appliquer la méthodologie à la réhabilitation lourde ou l'étendre aux habitats groupés et aux petits collectifs.

Même si la conception dans le résidentiel neuf impacte le coût futur de la rénovation, la réhabilitation du parc résidentiel reste l'enjeu principal et l'adaptation de la méthodologie un axe de recherche important. La méthode développée dans ces travaux n'est pas directement transférable aux cas de rénovations légères qui nécessitent la prise en compte de la séquentialité des mesures de rénovations. Cependant dans le cas de rénovation lourde où un bâtiment est remis à neuf, la méthodologie est applicable. Bien que le solaire thermique soit déjà utilisé dans la rénovation, l'utilisation de l'approche proposée pourrait amener à identifier de nouveaux compromis. De plus, avec une configuration existante (bâtiment et systèmes) pouvant être utilisée comme référence, l'évaluation du gain de performance d'un SSC est directe. Il est cependant important de tenir compte des limites propres à la rénovation, comme les contraintes architecturales autant au niveau technique que esthétique.

Aussi, bien que la maison individuelle représente plus de la moitié des 35 millions de logements en France, la tendance est en train de s'inverser et l'habitat collectif est favorisé depuis 2008. Il apparaît donc intéressant d'étendre la méthodologie pour traiter le dimensionnement d'un immeuble collectif ou d'un îlot de maisons individuelles. Avec la RT 2012, les frais de chauffage sont maintenant obligatoirement individualisés mais il est toujours possible d'opter pour un système collectif pour le chauffage et la production d'ECS en ajoutant des compteurs individuels. Le choix d'un système mutualisé ou individuel impactera directement les moyens à mettre en œuvre pour intégrer la production locale en solaire thermique. L'algorithme proposé est suffisamment générique pour être adapté à cette application. Cependant, un effort de modélisation important est nécessaire afin de tenir compte du changement d'échelle. Il est notamment nécessaire de développer des modèles comportementaux et de tenir compte du foisonnement de l'énergie.

Dans les deux cas, il est indispensable de correctement définir les objectifs d'optimisation qui impactent fortement la nature des solutions du front de Pareto.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.J., Marszal et al. (2011). « Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies ». In : *Energy and Buildings* (43).4, 971-979. DOI : [10.1016/j.enbuild.2010.12.022](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022). (Cf. p. 36, 38).
- ABOUL-ELLA HASSANIEN, Eid Emary (2015). *Swarm Intelligence : Principles, Advances, and Applications*. CRC PR INC. 210 Seiten. ISBN : 1498741061. (Cf. p. 124, 129).
- ACHUTARAO, Krishna Mirle et al. (2013). « Detection and Attribution of Climate Change : from Global to Regional ». In : *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Sous la dir. d'United Kingdom CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS Cambridge et USA NEW YORK NY (cf. p. 30).
- ADEME (2015). *Climat, air et Énergie édition 2015*. Rapp. tech. ADEME (cf. p. 28, 33, 34).
- ADEME, COSTIC (juil. 2016). *Les besoins d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif*. ADEME, COSTIC. (Cf. p. 91).
- AKBARI, Reza et al. (fév. 2012). « A multi-objective artificial bee colony algorithm ». In : *Swarm and Evolutionary Computation* (2), 39-52. DOI : [10.1016/j.swevo.2011.08.001](https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.08.001) (cf. p. 130).
- ARMAND-DECKER, Stéphanie (2015). « Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif pour la construction bois : prise en compte du confort des usagers, de l'impact environnemental et de la sécurité de l'ouvrage ». Thèse de doct. Université de Bordeaux et Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux (cf. p. 114, 124, 126).
- ASAE, S. Rasoul et al. (2014). « Preliminary study for solar combisystem potential in Canadian houses ». In : *Applied Energy* (130), 510-518. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.048>. (Cf. p. 64).
- ATASHKARI, K. et al. (juin 2011). « Multi-objective optimization of power and heating system based on artificial bee colony ». In : *2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI : [10.1109/inista.2011.5946159](https://doi.org/10.1109/inista.2011.5946159) (cf. p. 129).
- ATHIENITIS, Andreas et William O'BRIEN (11 fév. 2015). *Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings*. Ernst W. + Sohn Verlag. 396 p. ISBN : 978-3-433-03083-7. (Cf. p. 36).
- ATTIA, Shady et al. (2013). « Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design ». In : *Energy and Buildings* (60), 110-124. DOI : [10.1016/j.enbuild.2013.01.016](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.016). (Cf. p. 106).
- AUGSTEN, Eva et Bärbel EPP (fév. 2017). *Solar Process Heat : Surprisingly popular*. Rapp. tech. Sun & Wind Energy (cf. p. 55).
- BADESCU, Viorel et Mihail Dan STAIKOVICI (2006). « Renewable energy for passive house heating : Model of the active solar heating system ». In : *Energy and Buildings* (38).2, 129-141. DOI : [10.1016/j.enbuild.2005.04.001](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.001). (Cf. p. 62).
- BALES, Chris (2002a). *Appendix 6 : Generic System #11 : Space Heating Store with DHW Load Side Heat Exchanger(s) and External Auxiliary Boiler*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- (2002b). *Appendix 7 : Generic System #12 : Space Heating Store with DHW Load Side Heat Exchanger(s) and External Auxiliary Boiler (Advanced Version)*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).

- BELCHER, SE et al. (2005). « Constructing design weather data for future climates ». In : *Building Services Engineering Research and Technology* (26).1, 49-61. DOI : [10.1191/0143624405bt112oa](https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa). eprint : <http://dx.doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>. (Cf. p. 37).
- BI, Xiaojun et Yanjiao WANG (mar. 2011). « An improved artificial bee colony algorithm ». In : *2011 3rd International Conference on Computer Research and Development*. T. 2. IEEE, 174-177. DOI : [10.1109/ICCRD.2011.5764108](https://doi.org/10.1109/ICCRD.2011.5764108) (cf. p. 130, 133).
- BIERMANN, Frank et al. (2016). « Down to Earth : Contextualizing the Anthropocene ». In : *Global Environmental Change* (39), 341-350. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.11.004](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.11.004). (Cf. p. 29).
- BIRATTARI, Mauro et al. (jan. 2010). « F-Race and Iterated F-Race : An Overview ». In : *Experimental Methods for the Analysis of Optimization Algorithms*, 311-336. DOI : [10.1007/978-3-642-02538-9_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02538-9_13) (cf. p. 125).
- BLONDEAU, Patrice et al. (2002). « Multicriteria Analysis of Ventilation in Summer Period ». In : *Building and Environment* (37).2, 165-176. (Cf. p. 110).
- BOER, Karl W. et John A. DUFFIE (1^{er} juin 1985). *Advances in Solar Energy : An Annual Review of Research and Development, Volume 2* (cf. p. 44).
- BOIS, Jérémy et al. (2015). « Energy saving analysis of a solar combi-system using detailed control algorithm modeled with Modelica ». In : *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*. DOI : [10.1016/j.egypro.2015.11.389](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.389) (cf. p. 80).
- BONABEAU, Eric et al. (1999). *Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems*. Sous la dir. d'Oxford University Press. Oxford University Press. (Cf. p. 127).
- BONY, Jacques et Thierry PITTET (déc. 2002). *Appendix 4 : Generic System #8 : Space Heating Store with Double Load-Side Heat Exchanger for DHW*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- BORNATICO, Raffaele et al. (2012). « Optimal sizing of a solar thermal building installation using particle swarm optimization ». In : *Energy* (41).1, 31-37. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.026](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.026). (Cf. p. 64).
- BRUNDTLAND, Gro Harlem et Mansour AHALID (1987). *Our Common Future*. Rapp. tech. World Commission on Environment et Development (cf. p. 30).
- CAFLISCH, Russel E. (jan. 1998). « Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods ». In : *Acta Numerica* (7), 1. DOI : [10.1017/s0962492900002804](https://doi.org/10.1017/s0962492900002804) (cf. p. 115).
- CAICEDO, Emmanuel et al. (fév. 2015). *Compte du logement 2013 Premiers résultats 2014*. Rapp. tech. Commissariat général au développement durable - Service de l'observation et des statistiques (cf. p. 35).
- CAMAZINE, Scott et James SNEYD (avr. 1991). « A model of collective nectar source selection by honey bees : Self-organization through simple rules ». In : *Journal of Theoretical Biology* (149).4, 547-571. DOI : [10.1016/s0022-5193\(05\)80098-0](https://doi.org/10.1016/s0022-5193(05)80098-0) (cf. p. 127).
- CAMPOLONGO, Francesca et al. (2007). « An effective screening design for sensitivity analysis of large models ». In : *Environmental Modelling & Software* (22).10, 1509-1518. DOI : [10.1016/j.envsoft.2006.10.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.10.004). (Cf. p. 112, 113).
- CEN (2013). *PREN 15603 Energy performance of buildings — Overarching standard EPBD*. Rapp. tech. CEN (cf. p. 39).
- CHÈZE, David et Philippe PAPILLON (juin 2002). *Appendix 2 : Generic System #3a : Advanced Direct Solar Floor*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- CHING-LAI HWANG, Abu Syed Md. Masud (auth.) (1979). *Multiple Objective Decision Making — Methods and Applications : A State-of-the-Art Survey*. 1^{re} éd. T. 164. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 164. Springer Berlin Heidelberg. DOI : [10.1007/978-3-642-45511-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45511-7). (Cf. p. 109).

- COELLO, Carlos A. Coello (2002). *Theoretical and Numerical Constraint-Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms : A Survey of the State of the Art* (cf. p. 136).
- COLLETTE, Yann et Patrick SIARRY (oct. 2002). *Optimisation multiobjectif*. Sous la dir. d'EYROLLES. Algorithmes. Eyrolles (cf. p. 107, 118, 119, 141).
- COLORNI, Alberto et al. (1992). « An investigation of some properties of an ant algorithm ». In : *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature Conference*, 509-520 (cf. p. 124).
- COOPER, P.I. (1969). « The absorption of radiation in solar stills ». In : *Solar Energy* (12).3, 333-346. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4). (Cf. p. 48).
- COULSON, Kinsell (2012). *Solar and Terrestrial Radiation : Methods and Measurements* (cf. p. 43).
- CSTB (nov. 2011). *Méthode de calcul Th-BCE 2012*. Sous la dir. de CSTB. CSTB. (Cf. p. 79).
- CUADROS, F. et al. (2007). « A simple procedure to size active solar heating schemes for low-energy building design ». In : *Energy and Buildings* (39).1, 96-104. DOI : [10.1016/j.enbuild.2006.05.006](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.006). (Cf. p. 73).
- DEB, K. et al. (avr. 2002a). « A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II ». In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (6).2, 182-197. DOI : [10.1109/4235.996017](https://doi.org/10.1109/4235.996017) (cf. p. 124, 134).
- DEB, K. et al. (2002b). « Scalable Multi-Objective Optimization Test Problems ». In : *Congress on Evolutionary Computation (CEC 2002)*. IEEE Press, 825-830 (cf. p. 141).
- DEB, Kalyanmoy (juin 2000). « An efficient constraint handling method for genetic algorithms ». In : *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (186).2-4, 311-338. DOI : [10.1016/s0045-7825\(99\)00389-8](https://doi.org/10.1016/s0045-7825(99)00389-8) (cf. p. 136).
- DEB, Kalyanmoy et al. (déc. 2005). « Evaluating the e-Domination Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm for a Quick Computation of Pareto-Optimal Solutions ». In : *Evolutionary Computation* (13).4, 501-525. DOI : [10.1162/106365605774666895](https://doi.org/10.1162/106365605774666895) (cf. p. 135, 141).
- DENG, S. et al. (2013). « Performance optimization and analysis of solar combi-system with carbon dioxide heat pump ». In : *Solar Energy* (98), 212-225. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.001>. (Cf. p. 64).
- DUFFIE, J.A. et W.A. BECKMAN (jan. 1980). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley et Sons, New York, NY (cf. p. 43, 48, 52, 73).
- ECOFYS et al. (14 fév. 2013). *Towards nearly zero-energy buildings : Definition of common principles under the EPBD*. Rapp. tech. ECOFYS (cf. p. 35).
- ÉFFINERGIE (sept. 2015). *Règles techniques label BEPOS-Éffinergie 2013*. Rapp. tech. Éffinergie (cf. p. 207).
- ELLEHAUGE, Klaus (déc. 2002). *Appendix 1 : Generic System #2 : A Solar Combisystem Based on a Heat Exchanger between the Collector Loop and Space-Heating Loop*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- (2003). « Solar combisystems with heat exchanger between collector loop and space-heating loop ». In : *SES Solar World Congress 2003* (cf. p. 57).
- ELSAIED, Moustafa M. (1989). « Optimum orientation of absorber plates ». In : *Solar Energy* (42).2, 89-102. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(89\)90136-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(89)90136-9). (Cf. p. 58).
- EN 12975-2 (2001). *Thermal solar systems and components. Solar collectors. Test methods*. Standard. CEN (cf. p. 52, 53).
- (2006). *Thermal solar systems and components. Solar collectors. Test methods*. Rapp. tech. CEN (cf. p. 53).
- EN ISO 9806 (2013). *Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods (Final Draft)*. Rapp. tech. ISO (cf. p. 54).
- EUROPÉEN, Parlement et conseil de l'Union EUROPÉENNE (déc. 2002). *DIRECTIVE 2002/91/EC on the energy performance of buildings (EPBD)* (cf. p. 34, 35).

- EUROPÉEN, Parlement et conseil de l'Union EUROPÉENNE (mai 2010). *DIRECTIVE 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD recast)*. Official Journal of the European Union (cf. p. 35, 39).
- FAGGIANELLI, Ghjuvan Antone et al. (2017). « Uncertainty quantification for Energy Savings Performance Contracting : Application to an office building ». In : *Energy and Buildings* (152), 61-72. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.022>. (Cf. p. 114).
- FISHBURN, Peter C. (1970). *Utility Theory for Decision Making* (cf. p. 108).
- FLOURENTZOU, F. et C.-A. ROULET (fév. 2002). « Elaboration of retrofit scenarios ». In : *Energy and Buildings* (34).2, 185-192. DOI : [10.1016/S0378-7788\(01\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00106-2) (cf. p. 109).
- FORTIN, Félix-Antoine et al. (juil. 2012). « DEAP : Evolutionary Algorithms Made Easy ». In : *Journal of Machine Learning Research* (13), 2171-2175 (cf. p. 126).
- FRAISSE, G. et al. (2009). « Comparative study of various optimization criteria for SDHWS and a suggestion for a new global evaluation ». In : *Solar Energy* (83).2, 232-245. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.07.021>. (Cf. p. 63).
- GAO, Ying et al. (déc. 2013). « Multi-objective opposition-based learning fully informed particle swarm optimizer with favour ranking ». In : *2013 IEEE International Conference on Granular Computing (GrC)*. IEEE, 114-119. DOI : [10.1109/GrC.2013.6740391](https://doi.org/10.1109/GrC.2013.6740391) (cf. p. 133).
- GRENELLE (juin 2010). *Loi no 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, NOR : DEVX0822225L*. Rapp. tech. Assemblée nationale et le Sénat. (Cf. p. 32).
- HAKLI, Hüseyin et Harun UGUZ (2013). « Lévy Flight Distribution for Scout Bee in Artificial Bee Colony Algorithm ». In : *LNSE*, 254-258. DOI : [10.7763/lNSE.2013.v1.55](https://doi.org/10.7763/lNSE.2013.v1.55) (cf. p. 131).
- HALL, Irving J (1978). *Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET Stations*. SAND78-1601. Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories. Sandia Laboratories, (cf. p. 46).
- HART, Peter et al. (1968). « A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths ». In : *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* (4).2, 100-107. DOI : [10.1109/TSSC.1968.300136](https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136) (cf. p. 120).
- HARTL, Michael et al. (2012). « Experimental and Numerical Investigations on a Combined Biomass-Solar Thermal System ». In : *Energy Procedia* (30), 623-632. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.072>. (Cf. p. 63).
- HEIMRATH, Richard (avr. 2003). *Appendix 9 : Generic System #19 : Centralised Heat Production, Distributed Heat Load*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- HIN, Jason Ng Cheng et Radu ZMEUREANU (2012). « Optimization of a Residential Solar Combisystem for Minimum Life Cycle Energy and Cost ». In : *Proceedings of eSim 2012 : The Canadian Conference on Building Simulation* (cf. p. 64).
- (2014). « Optimization of a residential solar combisystem for minimum life cycle cost, energy use and exergy destroyed ». In : *Solar Energy* (100), 102-113. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.001>. (Cf. p. 64, 65).
- HOTTEL, H. C. et A. WHILLIER (1958). « Evaluation of flat-plate solar collector performance ». In : *Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy* (cf. p. 52).
- HSU, Feng-Hsiung (mar. 1999). « IBM's Deep Blue Chess grandmaster chips ». In : *IEEE Micro* (19).2, 70-81. DOI : [10.1109/40.755469](https://doi.org/10.1109/40.755469) (cf. p. 123).
- HUNN, Bruce D. et al. (1977). « Simulation and cost optimization of solar heating of buildings in adverse solar regions ». In : *Solar Energy* (19).1, 33-44. DOI : [10.1016/0038-092X\(77\)90086-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90086-X). (Cf. p. 53, 58).
- IEA (2016). *Key world energy statistics*. Rapp. tech. IEA (cf. p. 28).
- INSELBERG, Alfred et Bernard DIMSDALE (1987). « Parallel Coordinates for Visualizing Multi-Dimensional Geometry ». In : *Computer Graphics 1987*. Springer Japan, 25-44. DOI : [10.1007/978-4-431-68057-4_3](https://doi.org/10.1007/978-4-431-68057-4_3) (cf. p. 109).

- Iooss, Bertrand (2011). *Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques*. Rapp. tech. Journal de la Société Française de Statistique. (Cf. p. 111, 113, 114).
- IPCC (2014). *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Rapp. tech. PCC, Geneva, Switzerland, (cf. p. 29).
- JAEHNIG, Dagmar (oct. 2002). *Appendix 8 : Generic System #15 : Two Stratifiers in a Space Heating Storage Tank with an External Load-Side Heat Exchanger for DHW*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- JORDAN, Ulrike et Klaus VAJEN (2001). « Influence Of The DHW Load Profile On The Fractional Energy Savings : A Case Study Of A Solar Combi-System With TRNSYS Simulations ». In : *Solar Energy* (69, Supplement 6), 197-208. DOI : [10.1016/S0038-092X\(00\)00154-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00154-7). (Cf. p. 58).
- KALAMEES, Targo (jan. 2004). *IDA ICE : the simulation tool for making the whole building energy-and HAM analysis*. Rapp. tech. IEA, Annex 41 Whole Building Heat, Air et Moisture Response (cf. p. 73).
- KARABOGA, Dervis (oct. 2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. Rapp. tech. Computer Engineering Department Kayseri/Türkiye. (Cf. p. 127).
- KARABOGA, Dervis et Bahriye AKAY (juin 2007). « Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm on Training Artificial Neural Networks ». In : *2007 IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications*. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI : [10.1109/siu.2007.4298679](https://doi.org/10.1109/siu.2007.4298679) (cf. p. 129).
- (avr. 2011). « A modified Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems ». In : *Applied Soft Computing* (11).3, 3021-3031. DOI : [10.1016/j.asoc.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.12.001) (cf. p. 129, 130).
- KARABOGA, Dervis et al. (mar. 2012). « A comprehensive survey : artificial bee colony (ABC) algorithm and applications ». In : *Artificial Intelligence Review* (42).1, 21-57. DOI : [10.1007/s10462-012-9328-0](https://doi.org/10.1007/s10462-012-9328-0) (cf. p. 127, 129).
- KASHAN, Mina Husseinzadeh et al. (jan. 2012). « DisABC : A new artificial bee colony algorithm for binary optimization ». In : *Applied Soft Computing* (12).1, 342-352. DOI : [10.1016/j.asoc.2011.08.038](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.08.038) (cf. p. 129).
- KICSINY, R. et I. FARKAS (nov. 2012). « Improved differential control for solar heating systems ». In : *Solar Energy* (86).11, 3489-3498. DOI : [10.1016/j.solener.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.08.003). (Cf. p. 82).
- KLEIN, S.A. (avr. 2017). *TRNSYS 18 : A Transient System Simulation Program*. Rapp. tech. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA. (Cf. p. 72).
- KNOWLES, Joshua D. et David W. CORNE (juin 2000). « Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy ». In : *Evolutionary Computation* (8).2, 149-172. DOI : [10.1162/106365600568167](https://doi.org/10.1162/106365600568167) (cf. p. 134).
- KOPP, Greg et Judith L. LEAN (16 jan. 2011). « A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance ». In : *Geophysical Research Letters*. DOI : [10.1029/2010GL045777](https://doi.org/10.1029/2010GL045777) (cf. p. 43).
- KOPPEN, C.W.J. van et al. (1979). « The actual benefits of thermally stratified storage in a small and a medium size solar system ». In : *Sun 2 : proceedings of the International Solar Energy Society silver jubilee congress* (cf. p. 58).
- KUTZ, Myer (14 jan. 2013). *Handbook of Measurement in Science and Engineering, Volume 1* (cf. p. 44).
- LAUMANN, M. et al. (sept. 2002). « Combining Convergence and Diversity in Evolutionary Multiobjective Optimization ». In : *Evolutionary Computation* (10).3, 263-282. DOI : [10.1162/106365602760234108](https://doi.org/10.1162/106365602760234108) (cf. p. 134).
- LETZ, Thomas et al. (2009). *A new concept for combisystems characterisation : the FSC method*. Rapp. tech. ADEME (cf. p. 59).

- LI, Guoqiang et al. (jan. 2012). « Development and investigation of efficient artificial bee colony algorithm for numerical function optimization ». In : *Applied Soft Computing* (12).1, 320-332. DOI : [10.1016/j.asoc.2011.08.040](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.08.040) (cf. p. 130).
- LÖF, G. O. G. et D. J. CLOSE (1967). « Solar Water Heaters ». In : *Low Temperature Engineering Application of Solar Energy* (cf. p. 58).
- LOPEZ-IBANEZ, Manuel et Thomas STUTZLE (déc. 2012). « The Automatic Design of Multiobjective Ant Colony Optimization Algorithms ». In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (16).6, 861-875. DOI : [10.1109/tevc.2011.2182651](https://doi.org/10.1109/tevc.2011.2182651) (cf. p. 125).
- LUND, P.D. (2005). « Sizing and applicability considerations of solar combisystems ». In : *Solar Energy* (78).1, 59-71. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.07.008>. (Cf. p. 62).
- MA, Xiaoliang et al. (déc. 2014). « MOEA/D with opposition-based learning for multiobjective optimization problem ». In : *Neurocomputing* (146), 48-64. DOI : [10.1016/j.neucom.2014.04.068](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.04.068) (cf. p. 133).
- MALEN, Dutka et al. (2009). « Implementation of a polynomial chaos toolbox in Open Turns with test-case application ». In : *10th International Conference on Structure Safety and Reliability (ICOSSAR), Osaka, Japan* (cf. p. 115).
- MANTEGNA, Rosario Nunzio (mai 1994). « Fast, accurate algorithm for numerical simulation of Lévy stable stochastic processes ». In : *Physical Review E* (49).5, 4677-4683. DOI : [10.1103/physreve.49.4677](https://doi.org/10.1103/physreve.49.4677) (cf. p. 132).
- MARSZAL, Anna Joanna et al. (2010). « Net Zero Energy Buildings-Calculation Methodologies versus National Building Codes ». In : *EuroSun2010*. Sous la dir. d'EUROSUN (cf. p. 38).
- MARTINOPOULOS, Georgios et Georgios TSALIKIS (2014). « Active solar heating systems for energy efficient buildings in Greece : A technical economic and environmental evaluation ». In : *Energy and Buildings* (68, Part A), 130-137. DOI : [10.1016/j.enbuild.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.024). (Cf. p. 63).
- MAUTHNER, Franz et al. (mai 2016). *Solar Heat Worldwide, Markets and Contribution to the Energy Supply 2014*. Rapp. tech. IEA Solar Heating & Cooling Programme (cf. p. 56).
- MCINTIRE, William R. (1982). « Factored approximations for biaxial incident angle modifiers ». In : *Solar Energy* (29).4, 315-322. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90246-8](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(82)90246-8). (Cf. p. 53).
- MEADOWS, Donella H. et al. (1972). *The Limits to growth : A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books. ISBN : 0-87663-165-0. (Cf. p. 30).
- MENA, Sami Ben (2000). « Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision ». In : *BASE*. (Cf. p. 107).
- MERHEB, Rania (4 déc. 2013). « Fiabilité des outils de prévision du comportement des systèmes thermiques complexes ». Thèse de doct. Université de Bordeaux (cf. p. 115, 163).
- MICHAEL GUNTSCH, Martin Middendorf (2003). *Solving Multi-criteria Optimization Problems with Population-Based ACO*. (Cf. p. 124).
- MICHAELIDES, Ioannis M. (1993). « Computer simulation and optimisation of solar heating systems for Cyprus ». Thèse de doct. School of Electronics, Manufacturing Systems Engineering, Faculty of Engineering et Science (cf. p. 58).
- MINISTÈRE (oct. 2016). *Référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs*. Rapp. tech. Ministère du logement et de l'habitat durable, ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (cf. p. 40).
- MORRIS, Max D. (1991). « Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments ». In : *Technometrics*, 161-174. (Cf. p. 112).
- MOSALLAT, Faezeh et al. (2013). « Modeling, Simulation and Control of Flat Panel Solar Collectors with Thermal Storage for Heating and Cooling Applications ». In : *Procedia Computer Science* (19), 686-693. DOI : [10.1016/j.procs.2013.06.091](https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.091). (Cf. p. 72, 85).

- MUNARETTO, Fabio (7 fév. 2014). « Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Thèse de doct. Paris, ENMP. (Cf. p. 112).
- MUSALL, Eike et al. (mar. 2010). *Net Zero Energy Solar Buildings : An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects*. Rapp. tech. IEA Task 40 - Net Zero Energy Solar Buildings - Subtask C : Advanced Building Design, Technologies et Engineering. (Cf. p. 57).
- MYHRE, Gunnar et al. (2013). « Anthropogenic and Natural Radiative Forcing ». In : *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de Myhre G. et al. (cf. p. 28).
- NÉGAWATT (jan. 2017). *Scénario négaWatt 2017-2050 : Dossier de synthèse*. Rapp. tech. Association négaWatt (cf. p. 32).
- NF EN 12977-1 (jan. 2013). *Installations solaires thermiques et leurs composants - Installations assemblées à façon - Partie 1 : exigences générales pour chauffe-eau solaires et installations solaires combinées*. Standard. AFNOR (cf. p. 91).
- NF EN 410 (avr. 2011). *Verre dans la construction - Détermination des caractéristiques lumineuses et solaires des vitrages*. Standard. AFNOR. (Cf. p. 77, 151).
- NF EN 673 (avr. 2011). *Verre dans la construction - Détermination du coefficient de transmission thermique, U - Méthode de calcul*. Standard. AFNOR. (Cf. p. 77, 151).
- NF EN ISO 6946 (juin 2008). *Composants et parois de bâtiments - Résistance thermique et coefficient de transmission thermique - Méthode de calcul*. Standard. AFNOR. (Cf. p. 78).
- NORIS, Federico et al. (sept. 2013). *Measurement and Verification protocol for Net Zero Energy Buildings*. Rapp. tech. IEA SHC/ECBCS Task 40/Annex 52 – Towards Net Zero Energy solar Buildings (cf. p. 38).
- NOUIDUI, Thierry Stephane et al. (2012). « Validation and application of the room model of the Modelica Buildings library ». In : *Proceedings of the 9th International Modelica Conference* (cf. p. 76).
- OMKAR, S.N. et al. (jan. 2011). « Artificial Bee Colony (ABC) for multi-objective design optimization of composite structures ». In : *Applied Soft Computing* (11).1, 489-499. DOI : [10.1016/j.asoc.2009.12.008](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.12.008) (cf. p. 130).
- OSÓRIO, Tiago et Maria João CARVALHO (2014). « Testing of solar thermal collectors under transient conditions ». In : *Solar Energy* (cf. p. 53).
- PAUL, Gerald (nov. 2010). « Comparative performance of tabu search and simulated annealing heuristics for the quadratic assignment problem ». In : *Operations Research Letters* (38).6, 577-581. DOI : [10.1016/j.orl.2010.09.009](https://doi.org/10.1016/j.orl.2010.09.009) (cf. p. 124).
- PERERS, Bengt et Chris BALES (déc. 2002). *A Solar Collector Model for TRNSYS Simulation and System Testing - Task 26 - Subtask B*. Rapp. tech. IEA (cf. p. 72).
- PEREZ, Richard et al. (1990). « Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance ». In : *Solar Energy* (44).5, 271-289. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H). (Cf. p. 218).
- PETER, Markus (mar. 2003). *Appendix 5 : Generic System #9b : Space Heating Store with Immersed DHW Tank and External DHW Store with Auxiliary*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- PEUSER, Felix A. et al. (avr. 2005). *Installations solaires thermiques : Conception et mise en oeuvre*. Sous la dir. de Le MONITOR. ISBN : 2-281-11266-7 (cf. p. 82).
- RAHNAMAYAN, Shahryar et al. (mar. 2008). « Opposition versus randomness in soft computing techniques ». In : *Applied Soft Computing* (8).2, 906-918. DOI : [10.1016/j.asoc.2007.07.010](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.07.010) (cf. p. 133).
- RAO, R V et P J PAWAR (nov. 2009). « Grinding process parameter optimization using non-traditional optimization algorithms ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture* (224).6, 887-898. DOI : [10.1243/09544054jem1782](https://doi.org/10.1243/09544054jem1782) (cf. p. 129).

- RDH, Building Engineering Ltd (avr. 2014). *International Window Standards*. Rapp. tech. RDH, Building Engineering Ltd (cf. p. 77).
- RECHT, Thomas (23 sept. 2016). « Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive ». Thèse de doct. École nationale supérieure des mines (Paris). (Cf. p. 122, 124).
- REY, Anthony et Radu ZMEUREANU (2016). « Multi-objective optimization of a residential solar thermal combisystem ». In : *Solar Energy* (139), 622-632. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.008>. (Cf. p. 64).
- RIVALLAIN, Mathieu (2013). « Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants ». Thèse de doct. Université Paris-Est (cf. p. 120, 122, 124).
- ROBERT, Amélie et Michaël KUMMERT (2012). « Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past ». In : *Building and Environment* (55), 150-158. DOI : [10.1016/j.buildenv.2011.12.014](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.014). (Cf. p. 37).
- ROY, Bernard (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Collection Gestion. Economica. ISBN : 9782717809015. (Cf. p. 106).
- (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. 1^{re} éd. Nonconvex Optimization and Its Applications 12. Springer US. DOI : [10.1007/978-1-4757-2500-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1). (Cf. p. 106).
- RUANO, M.V. et al. (2012). « An improved sampling strategy based on trajectory design for application of the Morris method to systems with many input factors ». In : *Environmental Modelling & Software* (37), 103-109. DOI : [10.1016/j.envsoft.2012.03.008](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.03.008). (Cf. p. 113).
- SAATY, R.W. (1987). « The analytic hierarchy process—what it is and how it is used ». In : *Mathematical Modelling* (9).3, 161-176. DOI : [10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8). (Cf. p. 108).
- SALOM, Jaume et al. (oct. 2011). « Understanding net zero energy buildings : Evaluation of load matching and grid interaction indicators ». In : *Building Simulation 2011* (cf. p. 38).
- SALOM, Jaume et al. (mar. 2014). *Analysis of load match and grid interaction indicators in net zero energy buildings with high-resolution data*. Rapp. tech. IEA SHC/ECBCS Task 40/Annex 52 – Towards Net Zero Energy solar Buildings (cf. p. 38).
- SALOMON, Thierry et al. (jan. 2012). *Manifeste négaWatt : Réussir la transition énergétique*. Domaines du possible, Actes Sud. Domaine du possible Actes Sud (cf. p. 31, 32).
- SALTELLI, Andrea et al. (fév. 2004). *Sensitivity Analysis in Practice*. Wiley-Blackwell. DOI : [10.1002/0470870958](https://doi.org/10.1002/0470870958) (cf. p. 112).
- SARTORI, Igor et al. (mar. 2010). *Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings*. Rapp. tech. IEA Task 40 - Net Zero Energy Solar Buildings - Subtask A : Definitions et Implications. (Cf. p. 37, 38).
- SARTORI, Igor et al. (mai 2012). « Net zero energy buildings : A consistent definition framework ». In : *Energy and Buildings* (48), 220-232. DOI : [10.1016/j.enbuild.2012.01.032](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032). (Cf. p. 36, 37).
- SEELEY, Thomas D. (1996). *The Wisdom of the Hive : The Social Physiology of Honey Bee Colonies*. HARVARD UNIV PR. 318 Seiten. ISBN : 0674953762. (Cf. p. 128).
- SHAH, Louise Jivan (oct. 2002). *Appendix 3 : Generic System #4 : DHW Tank as a Space-Heating Storage Device*. Rapp. tech. IEA SHC - Task 26 (cf. p. 61).
- SHARIAH, Adnan et al. (août 2002). « Optimizing the tilt angle of solar collectors ». In : *Renewable Energy* (26).4, 587-598. DOI : [10.1016/S0960-1481\(01\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00106-9). (Cf. p. 62, 93).
- SHARMA, Harish et al. (déc. 2012). « Opposition based lévy flight artificial bee colony ». In : *Memetic Computing* (5).3, 213-227. DOI : [10.1007/s12293-012-0104-0](https://doi.org/10.1007/s12293-012-0104-0) (cf. p. 130, 131, 133).
- SHEA, Kristina et al. (2006). « Multicriteria Optimization of Paneled Building Envelopes Using Ant Colony Optimization ». In : *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Science mathplus Business Media, 627-636. DOI : [10.1007/11888598_56](https://doi.org/10.1007/11888598_56) (cf. p. 124).
- SILVER, David et al. (jan. 2016). « Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search ». In : *Nature* (529).7587, 484-489. DOI : [10.1038/nature16961](https://doi.org/10.1038/nature16961) (cf. p. 123).

- STERN, Nicholas (30 oct. 2006). *Stern Review on the Economics of Climate Change*. Rapp. tech. Gouvernement du Royaume-Uni (cf. p. 31).
- STREICHER, W. et al. (avr. 2003). *Report on Solar Combi-System Model in Task 26 (System Description, Modelling, Sensitivity, Optimisation) - Task26 - Subtask C*. English. IEA Task26. (Cf. p. 58).
- STREICHER, Wolfgang et Richard HEIMRATH (2007). *Analysis of System Reports of Task 26 for Sensitivity of Parameters - Task 26 - Subtask C (revised)*. Rapp. tech. IEA (cf. p. 59, 60, 62, 93).
- THÜR, Alexander (2011). *Solar Combisystems Promotion and Standardisation*. Rapp. tech. CombiSol project (cf. p. 63).
- TIZHOOSH, H.R. (2005). « Opposition-Based Learning : A New Scheme for Machine Intelligence ». In : *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTICtextquotesingle06)*. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 695-701. DOI : [10.1109/cimca.2005.1631345](https://doi.org/10.1109/cimca.2005.1631345) (cf. p. 133).
- TORCELLINI, Paul et Drury CRAWLEY (sept. 2006). « Understanding Zero-Energy Buildings ». In : *ASRAE journal* (cf. p. 36).
- TORCELLINI, Paul et al. (2006). « Zero Energy Buildings : A Critical Look at the Definition ». In : *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. National Renewable Energy Laboratory. DOI : [10.3992/jgb.6.1.46](https://doi.org/10.3992/jgb.6.1.46) (cf. p. 36, 38).
- TSAI, Hsing-Chih (fév. 2014). « Integrating the artificial bee colony and bees algorithm to face constrained optimization problems ». In : *Information Sciences* (258), 80-93. DOI : [10.1016/j.ins.2013.09.015](https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.09.015) (cf. p. 130).
- TSALIKIS, Georgios et Georgios MARTINOPOULOS (2015). « Solar energy systems potential for nearly net zero energy residential buildings ». In : *Solar Energy* (115), 743-756. DOI : [10.1016/j.solener.2015.03.037](https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.037). (Cf. p. 63, 65).
- UCAR, Aynur et Mustafa INALLI (2008). « Thermal and economic comparisons of solar heating systems with seasonal storage used in building heating ». In : *Renewable Energy* (33).12, 2532-2539. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.019>. (Cf. p. 63).
- VISSCHER, P. Kirk et Thomas D. SEELEY (1982). « Foraging Strategy of Honeybee Colonies in a Temperate Deciduous Forest ». In : *Ecology* (63).6, 1790-1801. DOI : [10.2307/1940121](https://doi.org/10.2307/1940121). (Cf. p. 127).
- VORGER, Éric (2014). « Étude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doct. École nationale supérieure des mines de Paris (cf. p. 191).
- Voss, Karsten et al. (sept. 2010). « Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings ». In : *EuroSun 2010*. DOI : [10.18086/eurosun.2010.06.24](https://doi.org/10.18086/eurosun.2010.06.24) (cf. p. 38).
- Voss, Karsten et al. (2011). « From Low-Energy to Net Zero-Energy Buildings : Status and Perspectives ». In : *Journal of Green Building* (6).1, 46-57. DOI : [10.3992/jgb.6.1.46](https://doi.org/10.3992/jgb.6.1.46). eprint : <http://dx.doi.org/10.3992/jgb.6.1.46> (cf. p. 37).
- WEISS, Werner et al. (mai 2017). *Global Market Development and Trends in 2016, Detailed Mark et Figures 2015*. Rapp. tech. IEA Solar Heating & Cooling Programme (cf. p. 55, 56).
- WETTER, Michael et al. (nov. 2011). *Modeling of heat transfer in rooms in the modelica buildings library*. Sous la dir. de Proc. of the 12TH IBPSA CONFERENCE (cf. p. 76, 218).
- WETTER, Michael et al. (2014). « Modelica Buildings library ». In : *Journal of Building Performance Simulation* (7).4, 253-270. DOI : [10.1080/19401493.2013.765506](https://doi.org/10.1080/19401493.2013.765506). eprint : <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2013.765506> (cf. p. 75).
- WETTER, Michael et al. (2015). « IEA EBC Annex 60 modelica library – an international collaboration to develop a free open-source model library for buildings and community energy systems ». In : *14th Conference of International Building Performance Simulation Association* (cf. p. 75).

- WETTER, Michael et al. (2016). « Equation-based languages : A new paradigm for building energy modeling, simulation and optimization ». In : *Energy and Buildings* (117), 290-300. DOI : [10.1016/j.enbuild.2015.10.017](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.017) (cf. p. 73).
- WIENER, Norbert (1938). « The Homogeneous Chaos ». In : *American Journal of Mathematics* (60).4, 897-936. (Cf. p. 115).
- WILCOX, S. et W. MARION (mai 2008). *Users Manual for TMY3 Data Sets*. Rapp. tech. National Renewable Energy Laboratory (cf. p. 46).
- WOLDESENBET, Yonas G. et al. (sept. 2007). « Constraint handling in multi-objective evolutionary optimization ». In : *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. IEEE, 3077-3084. DOI : [10.1109/CEC.2007.4424864](https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4424864) (cf. p. 130, 136, 138).
- WOLPERT, D. H. et W. G. MACREADY (avr. 1997). « No free lunch theorems for optimization ». In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (1).1, 67-82. DOI : [10.1109/4235.585893](https://doi.org/10.1109/4235.585893) (cf. p. 125).
- WUESTLING, M. D. et al. (1^{er} août 1985). « Promising Control Alternatives for Solar Water Heating Systems ». In : *Journal of Solar Energy Engineering*. DOI : [10.1115/1.3267681](https://doi.org/10.1115/1.3267681) (cf. p. 58).
- XIANG, Wan-li et Mei-qing AN (mai 2013). « An efficient and robust artificial bee colony algorithm for numerical optimization ». In : *Computers & Operations Research* (40).5, 1256-1265. DOI : [10.1016/j.cor.2012.12.006](https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.12.006) (cf. p. 130).
- XIU, Dongbin et George Em KARNIADAKIS (2002). « The Wiener–Askey Polynomial Chaos for Stochastic Differential Equations ». In : *SIAM Journal on Scientific Computing* (24).2, 619-644. DOI : [10.1137/S1064827501387826](https://doi.org/10.1137/S1064827501387826). eprint : <https://doi.org/10.1137/S1064827501387826>. (Cf. p. 115).
- YANG, Xin-She (2014). « Random Walks and Optimization ». In : *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. Elsevier BV, 45-65. DOI : [10.1016/b978-0-12-416743-8.00003-8](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-416743-8.00003-8) (cf. p. 131).
- YANG, Xin-She et Suash DEB (juin 2013). « Multiobjective cuckoo search for design optimization ». In : *Computers & Operations Research* (40).6, 1616-1624. DOI : [10.1016/j.cor.2011.09.026](https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.026) (cf. p. 131).
- YUMRUTAS, Recep et Mazhar ÜNSAL (2012). « Energy analysis and modeling of a solar assisted house heating system with a heat pump and an underground energy storage tank ». In : *Solar Energy* (86).3, 983-993. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.008>. (Cf. p. 63).
- ZAMBOLIN, E. et D. Del COL (2010). « Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions ». In : *Solar Energy* (84).8, 1382-1396. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.020>. (Cf. p. 53, 54).
- (2012). « An improved procedure for the experimental characterization of optical efficiency in evacuated tube solar collectors ». In : *Renewable Energy* (43), 37-46. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.011>. (Cf. p. 53).
- ZHANG, Changsheng et al. (juil. 2010). « An artificial bee colony approach for clustering ». In : *Expert Systems with Applications* (37).7, 4761-4767. DOI : [10.1016/j.eswa.2009.11.003](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.003) (cf. p. 129).
- ZHANG, Hao et al. (juin 2012). « Multi-hive artificial bee colony algorithm for constrained multi-objective optimization ». In : *Evolutionary Computation (CEC), 2012 IEEE Congress on*, 1-8. DOI : [10.1109/CEC.2012.6256499](https://doi.org/10.1109/CEC.2012.6256499) (cf. p. 130).
- ZHAO, Haiyan et al. (2010). « A Hybrid Swarm Intelligent Method Based on Genetic Algorithm and Artificial Bee Colony ». In : *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Science mathplus Business Media, 558-565. DOI : [10.1007/978-3-642-13495-1_68](https://doi.org/10.1007/978-3-642-13495-1_68) (cf. p. 130).
- ZHU, Guopu et Sam KWONG (déc. 2010). « Gbest-guided artificial bee colony algorithm for numerical function optimization ». In : *Applied Mathematics and Computation* (217).7, 3166-3173. DOI : [10.1016/j.amc.2010.08.049](https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.08.049) (cf. p. 130).

- ZIRNGIBL, Johann (mai 2014). « Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) in the CEN draft standard ». In : *REHVA journal* (cf. p. 39, 40).
- ZITZLER, Eckart et al. (2000). « Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms : Empirical Results ». In : *Evolutionary Computation* (8), 173-195 (cf. p. 134).
- ZITZLER, Eckart et al. (2001). *SPEA2 : Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*. Rapp. tech. Computer Engineering et Networks Laboratory (TIK), Department of Electrical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) (cf. p. 124).

Annexes

ÉNERGIE

TABLE A.1 – Coefficients conventionnels de passage en énergie primaire non renouvelable d'après ÉFFINERGIE (2015).

Énergie	Coefficient pour l'énergie entrant	Coefficient pour l'énergie sortante
Électricité	2,58	-2,58
Bois	0	-
Réseau de chaleur lorsque la chaleur est produite au moins à 50 % à partir de la biomasse, de géothermie, d'incinération de déchets ou d'énergie de récupération	0,5 ou la part de non-EnR si celle-ci est certifiée par un organisme indépendant	-
Autres réseaux de chaleur	1	-
Gaz, fioul, autres	1	-

CONSTRUCTION D'UN BÂTIMENT

Les étapes de construction d'un bâtiment public sont définies à travers la loi [85-704 du 12 juillet 1985](#) :

Programmation Aussi appelée phase de Faisabilité, elle fait principalement intervenir la maîtrise d'ouvrage qui établit le cahier des charges avec les tiers. Les besoins du client, l'objet de la construction, la faisabilité, et les appels d'offres sont réalisés.

Conception Elle fait intervenir la MOA et la maîtrise d'œuvre (MOE). Des études technique et architecturales permettent de définir plus finement le cahier des charges.

ESQ L'ESquisse ou AVant Projet vérifie la faisabilité technique du projet au regard des différentes contraintes (économique, technique, réglementaire). Durant cette phase sont définis : les paramètres d'usages (charges internes, scénarios), le cadre réglementaire (thermique, acoustique, mécanique), les objectifs d'exemplarité à travers l'obtention de labels (E + C-, BBCA...) et les caractéristiques de l'implémentation (données climatiques, étude du sol...).

APS L'Avant Projet Sommaire consiste à définir la géométrie générale du projet à travers la définition des principaux volumes et les coûts prévisionnels.

APD L'Avant Projet Définitif permet d'affiner la géométrie du bâtiment à partir des résultats des différentes études techniques. Les caractéristiques de l'enveloppe et les systèmes techniques sont arrêtés, les coûts prévisionnels découpés par lot.

PRO La phase de PROjet permet de finaliser l'étude et d'estimer à la fois le coût des travaux et d'exploitation. Le planning des travaux doit aussi être réalisé et le détail de chaque lot réalisé. Ces éléments sont décrits à travers un dossier des Spécificités Techniques détaillées (STD) et un Dossier de Consultation des Entreprises (DCE).

Réalisation Aussi appelée phase de construction, elle fait intervenir l'ensemble des acteurs du bâtiment, MOA, MOE, entreprises, tiers... Le cahier des charges, défini en phase de programmation puis affiné en phase de conception, est suivi. Cette phase comprend alors le suivi technique et financier du chantier mais aussi sa réception et mise en service.

ANNEXE C

BÂTIMENT

TABLE C.1 – Description détaillée des vitrages du bâtiment.

Orientation [°]	Hauteur [m]	Largeur [m]	U_w	U_f	U_g	Fraction châssis -	Composition -
			[W/(m ² .K)]				
Nord	0,95	0,6	1,3	2,09	1,1	0,2	PVC
Ouest	1,35	1,2	1,2	2,09	1,1	0,1	PVC
Ouest	1,35	1,2	1,2	2,09	1,1	0,1	PVC
Est	2,15	0,9	1,2	2,09	1,1	0,1	PVC
Est	2,15	1,6	1,6	3,6	1,1	0,2	ALU
Sud	2,15	2,4	1,6	3,6	1,1	0,2	ALU
Sud	1,2	1,35	1,2	2,09	1,1	0,1	PVC
Horizontal	1,18	1,14	1,5	2,17	1,21	0,3	BOIS

TABLE C.2 – Caractéristiques des vitrages en façades.

Matériaux	e [m]	λ [W/(m.K)]	τ_{sol} -	τ_{IR} -	$\acute{E}mis_{ext}$ -	$\acute{E}mis_{int}$ -	$R\acute{e}flec_{ext}$ -	$R\acute{e}flec_{ext}$ -
SGG Planilux	0,04	1	0,849	0	0,837	0,837	0,076	0,076
Argon	0,016	-	-	-	-	-	-	-
SGG PlaniTHERM One	0,04	1	0,591	0	0,037	0,837	0,312	0,264

TABLE C.3 – Caractéristiques de la fenêtre de toit.

Matériaux	e [m]	λ [W/(m.K)]	τ_{sol} -	τ_{IR} -	$\acute{E}mis_{ext}$ -	$\acute{E}mis_{int}$ -	$R\acute{e}flec_{ext}$ -	$R\acute{e}flec_{int}$ -
Verre ext	0,01	1	0,44	0	0,88	0,88	0,075	0,075
Air	0,016	-	-	-	-	-	-	-
Verre int	0,01	1	0,44	0	0,88	0,88	0,075	0,075

TABLE C.4 – Caractéristiques des gaz.

Gaz	a_k [W/(m.K)]	b_k [W/(m.K ²)]	a_{mu} [Pa.s]	b_{mu} [N.s/(m ² .K)]	a_c [J/(kg.K)]
Argon	$2,285 \times 10^{-3}$	$5,149 \times 10^{-5}$	$3,379 \times 10^{-6}$	$6,451 \times 10^{-8}$	521,9285
Air	$2,873 \times 10^{-3}$	$7,760 \times 10^{-5}$	$3,723 \times 10^{-6}$	$4,940 \times 10^{-8}$	1002,737

	b_c [J/(kg.K ²)]	MM [kg/mol]	P0 [bar]
Argon	0	$39,948 \times 10^{-3}$	101 325
Air	$1,2324 \times 10^{-2}$	$28,97 \times 10^{-3}$	101 325

TABLE C.5 – Description des parois de l'extérieur vers l'intérieur.

	e [m]	λ [W/(m.K)]	C_p [J/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]
Parois verticales				
Enduit	0,01	1,15	850	2000
Optibric (R=1,32 m ² .K/W)	0,2	0,1515	1000	685
Laine de verre	0,14	0,032 18	840	20
Plâtre	0,01	0,25	1000	820
Parois du puit de jour				
Laine de verre	0,16	0,032	840	20
Plâtre	0,01	0,25	1000	820
Parois du vide sanitaire				
Béton	0,2	1,13	1000	2000
Terre	4	0,52	50	2050
Plancher				
Chape béton	0,05	0,92	880	2300
Polyuréthane	0,1	0,0215	1590	35
Hourdis + polystyrène	0,12	0,0276	1450	35
Chape béton	0,05	0,92	880	2300
Plafond sous combles				
Laine de roche soufflée	0,365	0,045	1030	150
Plâtre	0,01	0,25	1000	820
Toiture				
Tuile	0,04	1	800	2000
Cloisons internes				
Plâtre	0,025	0,25	1000	900
Air (R=0,15 m ² .K/W)	-	-	-	-
Plâtre	0,025	0,25	1000	900

ANNEXE D

MODÉLISATION DU SYSTÈME SOLAIRE COMBINÉ

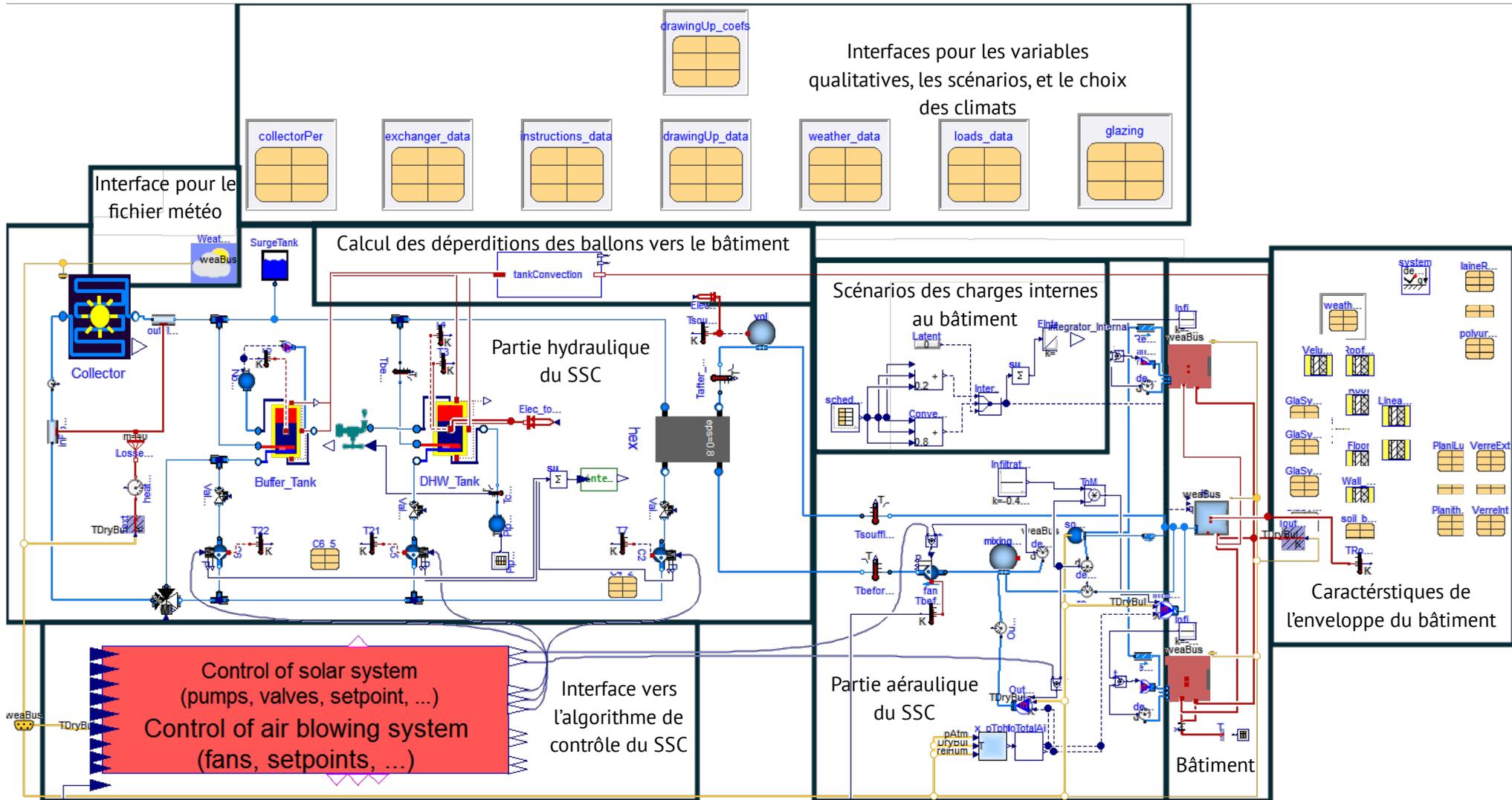


FIGURE D.1 – Représentation de l'ensemble du SSC (partie hydraulique et aéraulique) et du bâtiment sous *Dymola*.

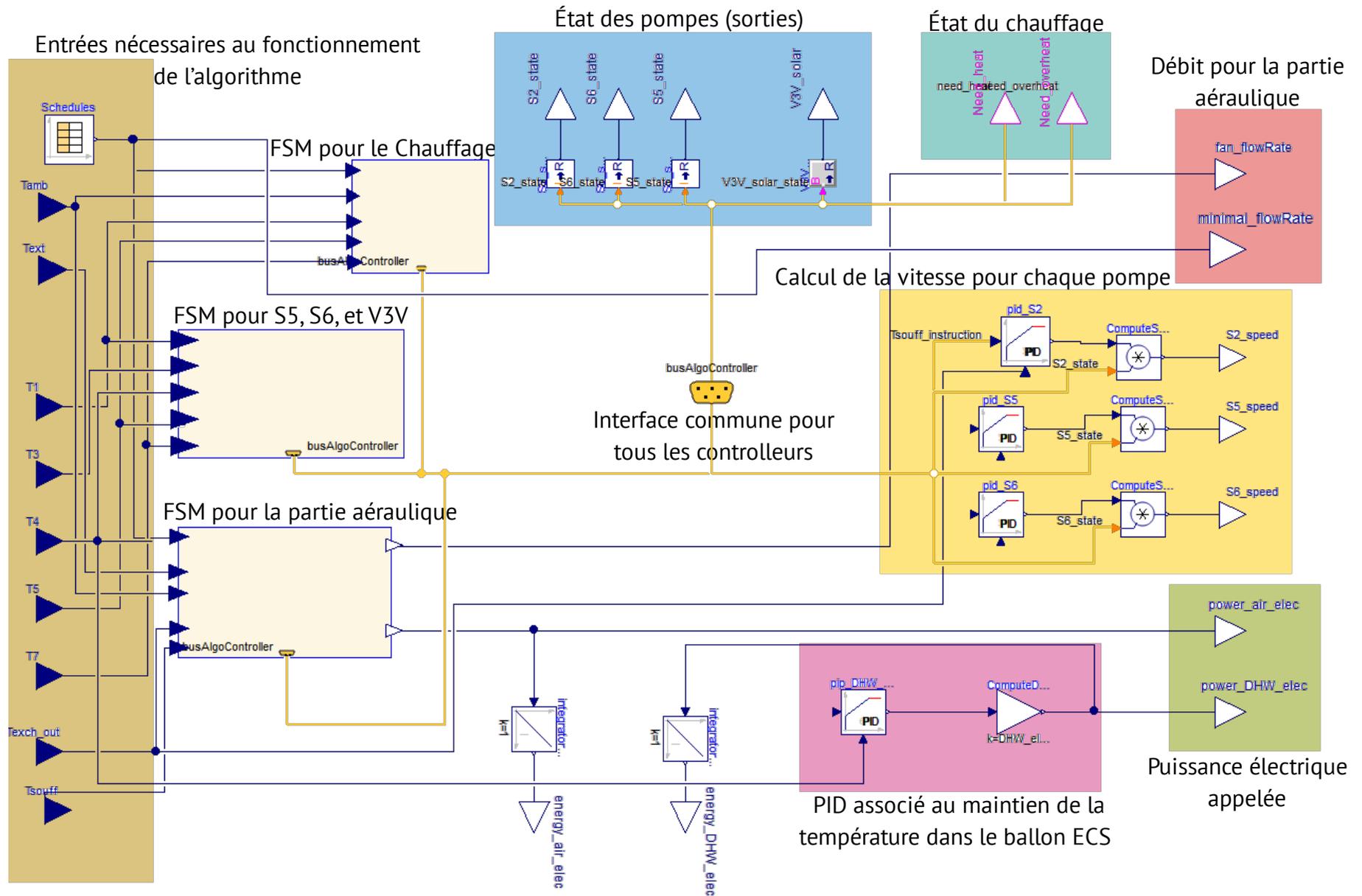


FIGURE D.2 – Représentation de l'algorithme de contrôle sous *Dymola*. Chaque FSM pointe vers un sous-modèle décrivant de manière détaillée le fonctionnement de l'algorithme.

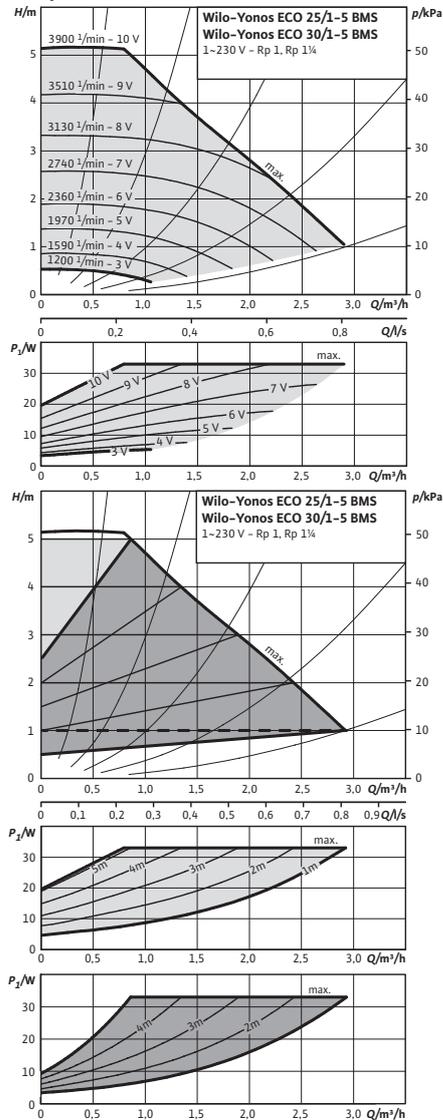
Description des modèles de la bibliothèque *Buildings*¹ retenus pour chaque composant du système modélisé dans ce manuscrit :

- Ballon** *Fluid.Storage.StratifiedEnhancedInternalHex* qui modélise un ballon avec stratification.
- Échangeur interne** *Fluid.Storage.BaseClasses.IndirectTankHeatExchanger*.
- Vase d'expansion** *Buildings.Fluid.Storage.ExpansionVessel*.
- Pompes** *Fluid.Movers.SpeedControlled_Nrpm* permettant de contrôler le indirectement le débit par modulation de la vitesse de rotation normalisée de la pompe.
- Ventilateurs** *Fluid.Movers.FlowControlled_m_flow*. permettant de contrôler le débit directement.
- Parseur météo** *BoundaryConditions.WeatherData.ReaderTMY3*. Nécessite de transformer le fichier météo dans un format propre au modèle. Un outil en *Java* est disponible pour convertir un fichier de type *.epw* dans le format supporté *.mos*.
- Capteur solaire** *Fluid.SolarCollectors.EN12975* implémentant l'équation quasi-dynamique décrite en [I.4.2](#).
- Rayonnement diffus** *BoundaryConditions.SolarIrradiation.DiffusePerez* permettant de calculé le rayonnement diffus ($G_{dif,inc}$) suivant le modèle développé par PEREZ et al. (1990).
- rayonnement direct** *BoundaryConditions.SolarIrradiation.DirectTiltedSurface* permettant de calculer le rayonnement direct ($G_{dir,inc}$) selon (I.3).
- Échangeur eau/air** *Fluid.HeatExchangers.ConstantEffectiveness* qui modélise un échangeur avec une efficacité constante fixée à 80 %.
- Zone chauffée** *Rooms.MixedAir* qui assume une zone où l'air est complètement mélangé. Le modèle calcule séparément les échanges radiatifs et conductifs et permet de modéliser des fenêtres et des scénarios internes (WETTER et al. 2011).
- Combles et Vide sanitaire** Une version simplifiée de *Rooms.MixedAir* ne permettant pas l'ajout de fenêtres ni d'apports internes.
- Fenêtres** *Rooms.Constructions.ConstructionWithWindow* séparant les apports radiatifs des apports convectifs nécessitant donc une description détaillée des composants de la fenêtre.
- Vanne 3 voies** *Fluid.Actuators.Valves.ThreeWayEqualPercentageLinear*
- Vanne 2 voies** *Fluid.Actuators.Valves.TwoWayEqualPercentage*
- Canalisation extérieures** *Fluid.FixedResistances.Pipe* permettant de discrétiser le volume de fluide afin de mieux évaluer les déperditions.
- Puisage** À partir d'une loi de mélange, le volume d'eau du ballon nécessaire pour obtenir une température de puisage de 40 °C est puisé par une pompe hors du ballon sanitaire.

1. <https://github.com/lbl-srg/modelica-buildings>

Data sheet: Wilo-Yonos ECO 25/1-5 BMS

Pump curves



Approved fluids (other fluids on request)

Heating water (in accordance with VDI 2035)	•
Water-glycol mixtures (max. 1:1; above 20% admixture, the pumping data must be checked)	•

Permitted field of application

Temperature range at max. ambient temperature +25 °C	-10...+110 °C
Temperature range at max. ambient temperature +40 °C	-10...+95 °C
Maximum permissible operating pressure	P_{max} 10 bar

Pipe connections

Threaded pipe union	Rp 1
Thread	G 1½
Overall length	L_0 180 mm

Motor/electronics

Energy efficiency index (EEI)	≤ 0.20
Electromagnetic compatibility	EN 61800-3
Emitted interference	EN 61000-6-3
Interference resistance	EN 61000-6-2
Speed control	Frequency converter
Protection class	IP X4D
Insulation class	F
Mains connection	1-230 V, 50/60 Hz
Speed	n 1200 - 3900 rpm
Rated power	P_2 30 W
Power consumption	P_1 5 - 33 W
Current consumption	I 0.06 - 0.29 A
Motor protection	integrated
Screwed cable connection connector	11 PG

Materials

Pump housing	Grey cast iron (EN-GJL-200)
Impeller	Plastic (PP - 40% GF)
Pump shaft	Stainless steel (X30CR13)
Bearing	Carbon, metal impregnated

Minimum suction head at suction port for avoiding cavitation at water pumping temperature

FIGURE D.3 – Fiche technique du circulateur Wilo-YonosECO 25/1-5 BMS.

Annex to Solar Keymark Certificate - Summary of EN ISO 9806:2013 Test Results					Licence Number		011-7S2665 R							
					Date issued		2016-06-27							
					Issued by		DIN CERTCO							
Licence holder		C&G ENERGY S.R.L.			Country		Italien							
Brand (optional)					Web		www.ktsolar.it							
Street, Number		Loc.Tà Terzerie			E-mail		info@ktsolar.it							
Postcode, City		84060 Ogliastro C.to (SA)			Tel		+39 3334904236							
Collector Type					Evacuated tubular collector									
					Power output per collector									
					Gb = 850 W/m ² ; Gd = 150 W/m ² ; u = 3 m/s									
					$\vartheta_m - \vartheta_a$									
					0 K	10 K	30 K	50 K	70 K	118 K				
Collector name					m ²	mm	mm	mm	W	W	W	W	W	W
PANNELLO SKY PRO 10 CPC 58					2.17	1 925	1 127	117	1 385	1 364	1 316	1 262	1 201	1 025
PANNELLO SKY PRO 12 CPC 58					2.59	1 927	1 342	116	1 653	1 628	1 571	1 506	1 433	1 223
PANNELLO SKY PRO 14 CPC 58					3.01	1 927	1 562	116	1 921	1 892	1 826	1 750	1 665	1 422
PANNELLO SKY PRO 16 CPC 58					3.43	1 927	1 782	116	2 189	2 156	2 081	1 995	1 898	1 620
PANNELLO SKY PRO 18 CPC 58					3.86	1 927	2 002	116	2 464	2 426	2 342	2 245	2 136	1 823
PANNELLO SKY PRO 20 CPC 58					4.28	1 927	2 222	116	2 732	2 690	2 596	2 489	2 368	2 021
PANNELLO SKY PRO 22 CPC 58					4.71	1 925	2 446	117	3 006	2 961	2 857	2 739	2 606	2 224
PANNELLO SKY PRO 10 ADVANCED					2.17	1 925	1 127	127	1 385	1 364	1 316	1 262	1 201	1 025
PANNELLO SKY PRO 12 ADVANCED					2.59	1 927	1 342	127	1 653	1 628	1 571	1 506	1 433	1 223
PANNELLO SKY PRO 14 ADVANCED					3.01	1 927	1 562	126	1 921	1 892	1 826	1 750	1 665	1 422
PANNELLO SKY PRO 16 ADVANCED					3.43	1 927	1 782	126	2 189	2 156	2 081	1 995	1 898	1 620
PANNELLO SKY PRO 18 ADVANCED					3.86	1 927	2 002	126	2 464	2 426	2 342	2 245	2 136	1 823
PANNELLO SKY PRO 20 ADVANCED					4.28	1 927	2 222	126	2 732	2 690	2 596	2 489	2 368	2 021
PANNELLO SKY PRO 22 ADVANCED					4.71	1 925	2 446	127	3 006	2 961	2 857	2 739	2 606	2 224
PANNELLO NATURAL SKY 12-200 L					2.59	1 927	1 342	116	1 653	1 628	1 571	1 506	1 433	1 223
PANNELLO NATURAL SKY 16-300 L					3.43	1 927	1 782	116	2 189	2 156	2 081	1 995	1 898	1 620
Power output per m ² gross area									638	629	607	582	553	472
Performance parameters test method					Quasi dynamic									
Performance parameters (related to AG)					$\eta_{0,b}$	c1	c2	c3	c4	c6	Kd			
Units					-	W/(m ² K)	W/(m ² K ²)	J/(m ³ K)	-	s/m	-			
Test results					0.641	0.935	0.004	0.000	0.000	0.000	0.972			
Incidence angle modifier test method					Quasi dynamic - outdoor									
Bi-directional incidence angle modifiers					Yes									
Incidence angle modifier					Angle	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Transversal					$K_{GT, coll}$	1.00	0.99	1.00	1.01	1.09	1.10	1.29	0.65	0.00
Longitudinal					$K_{GL, coll}$	1.00	0.99	0.97	0.95	0.90	0.81	0.66	0.33	0.00
Heat transfer medium for testing					Water-Glycole									
Flow rate for testing (per gross area, A _G)					dm/dt		0.017		kg/(sm ²)					
Maximum temperature difference for thermal performance calculations					$(\vartheta_m - \vartheta_a)_{max}$		118		K					
Standard stagnation temperature (G = 1000 W/m ² ; $\vartheta_a = 30^\circ\text{C}$)					ϑ_{stg}		259		°C					
Effective thermal capacity, incl. fluid (per gross area, A _G)					C/m ²		37.99		kJ/(Km ²)					
Maximum operating temperature					$\vartheta_{max, op}$		n.a		°C					
Maximum operating pressure					p _{max, op}		600		kPa					
Testing laboratory					TZS, ITW University Stuttgart				www.itw.uni-stuttgart.de					
Test report(s)					10COL943/2 10COL942/2 10COL943Q/3				Dated		22.06.2016 22.06.2016 22.06.2016			
Comments of testing laboratory					Datasheet version: 5.01, 2016-03-01									
DIN CERTCO • Alboinstraße 56 • 12103 Berlin, Germany Tel: +49 30 7562-1131 • Fax: +49 30 7562-1141 • E-Mail: info@dincertco.de • www.dincertco.de														

FIGURE D.4 – Certification Solar Keymark pour le capteur Kloben Sky Pro 12 CPC58.

Summary of EN 12975 Test Results, annex to Solar KEYMARK Certificate						Licence Number		011-7S1551 F			
						Issued		2015-03-25			
Company holding the		General Solar Systems GmbH				Country		Österreich			
Brand (optional)						Website		www.sonnenkraft.at			
Street, street number		Industriepark				E-mail		office@sonnenkraft.com			
Postal Code / City, province		A - 9300	St. Veit/Glan			Tel/Fax		+43 4212 45010-0 / 4212 45010-477			
Collector Type (flat plate glazed/un-glazed; evacuate tubular)						Flat plate collector - glazed					
Thermal / photo voltaic hybrid collector? (PVT collector)						No					
Integration in the roof possible ? (manufacturers declaration)						Yes					
Collector name	Aperture area (Aa) m ²	Gross length mm	Gross width mm	Gross height mm	Gross area (AG) m ²	Power output per collector module					
						G = 1000 W/m ²					
						Tm-Ta					
						0 K	10 K	30 K	50 K	70 K	
						W	W	W	W	W	
IDMK12-AL	1.11	1 016	1 228	109	1.25	849	804	707	599	482	
IDMK25-AL	2.33	2 061	1 225	107	2.52	1 782	1 688	1 483	1 258	1 012	
Performance test method						Glazed liquid heating collector - steady state - indoor					
Performance parameters related to aperture		η_0	a1	a2							
Units		-	W/(m ² K)	W/(m ² K ²)							
Test results - Flow rate and fluid see note 1		0.765	3.951	0.011							
Bi-directional incidence angle modifiers?		No <i>Kθ values are obligatory for 50°.</i>									
Incidence angle modifiers K θ (θ)		Angle	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Incidence angle modifier not bi-directional - leave fields blank		K θ (θ)	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.86	0.73	0.34	0.00
Stagnation temperature - Weather conditions see note 2						Tstg		191			°C
Effective thermal capacity						ceff = C/Ag		13.23			kJ/(m ² K)
Max. intended operation temperature - see note 3						Tmax,op		-			°C
Max. operation pressure - see note 3						pmax,op		1000			kPa
Pressure drop table - for a collector family, the values shall be for the module with highest ΔP per m ² aperture area											
Flow rate	kg/(s m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pressure drop, ΔP	Pa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Optional weather data		Location		Link							
Testing Laboratory		TZS, ITW University Stuttgart									
Website		http://www.itw.uni-stuttgart.de									
Test report id. number		09COL785OEM06, 09COL784OEM06, 09COL784QOEM06				Date of test report		2011.03.24			
During the test GDIF/GTOT was always between		0		and		1					
Comments of testing laboratory: none											
Note 1	Flow rate	0.020	kg/(s m ²)	Fluid	Water						
Note 2	Irradiance, G = 1000 W/m ² ; Ambient temperature, Ta=30 °C										
Note 3	Given by manufacturer										
Datashet version: 4.06, 2014-01-15											
DIN CERTCO • Alboinstraße 56 • 12103 Berlin Tel: +49 30 7562-1131 • Fax: +49 30 7562-1141 • E-Mail: info@dincertco.de • www.dincertco.de											

FIGURE D.5 – Certification Solar Keymark pour le capteur Sonnenkraft IDMK-25AL.

ANNEXE E

RÉPARTITION DES CAPTEURS

« Combien de rectangles sans chevauchements ni rotations peut contenir le triangle ABC? »

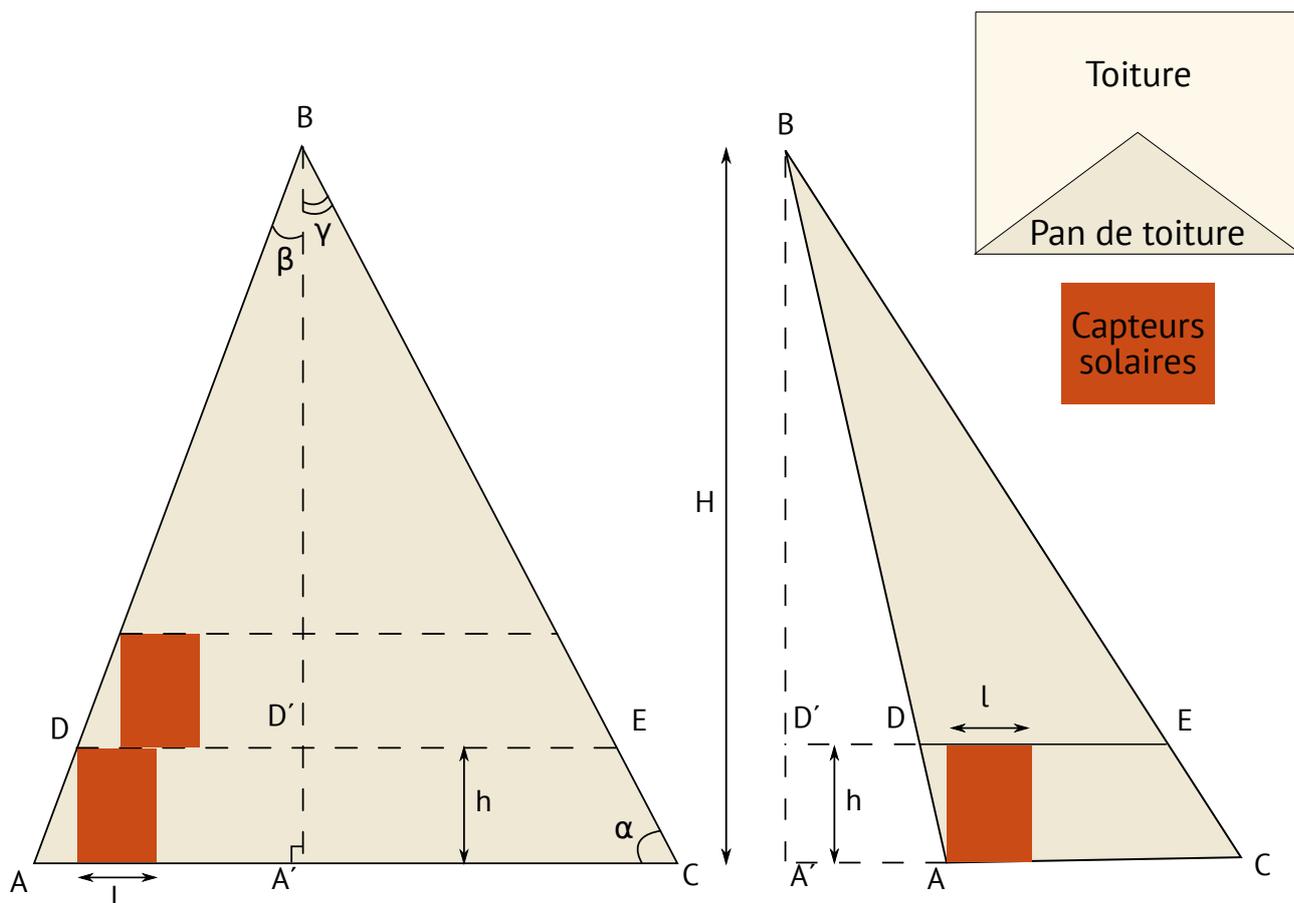


FIGURE E.1 – Représentation schématique du problème de calepinage pour un triangle aïgue (gauche) et un triangle obtuse (droite).

Considérons un rectangle de dimensions $l \times h$ et un triangle ABC (Fig. E.1). D'après la loi des cosinus (Théorème de Al Kashi) il est possible d'écrire :

$$\alpha = \arccos \left[\frac{AC^2 + BC^2 - AB^2}{2 \times AC \times BC} \right] \quad (E.1)$$

On peut alors définir la hauteur du triangle ABC en utilisant la trigonométrie et (E.1) :

$$H = \sin(\arccos[\alpha]) \times BC = \sin \left(\arccos \left[\frac{AC^2 + BC^2 - AB^2}{2 \times AC \times BC} \right] \right) \times BC \quad (E.2)$$

En utilisant le théorème de Thalès dans ABC et A'BC on peut ainsi définir la longueur DE en fonction de H.

$$DE = \frac{BE \times AC}{BC} = \frac{(H - h) \times AC}{H} \quad (E.3)$$

Le nombre total de rectangle sans chevauchement peut alors être définie suivant (E.4) :

$$N_{rect} = \sum_{n=1}^{\left\lfloor \frac{H}{h} \right\rfloor} \left\lfloor \frac{(H - n \times h) \times AC}{l \times H} \right\rfloor \quad (E.4)$$

ANALYSE DE SENSIBILITÉ

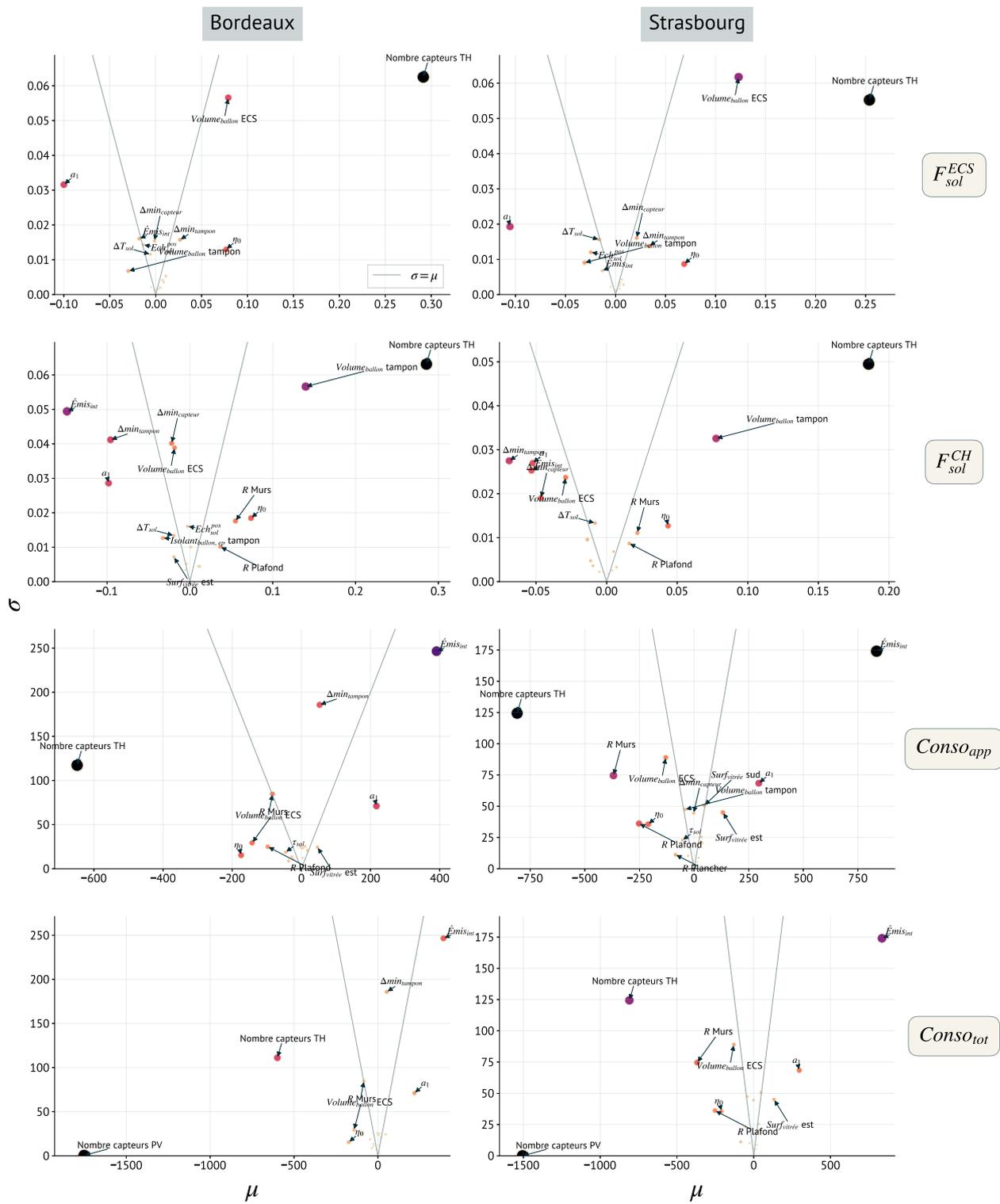


FIGURE F.1 – Résultat de l'analyse de Morris pour les indicateurs principaux ($f(\mu) = \sigma$).

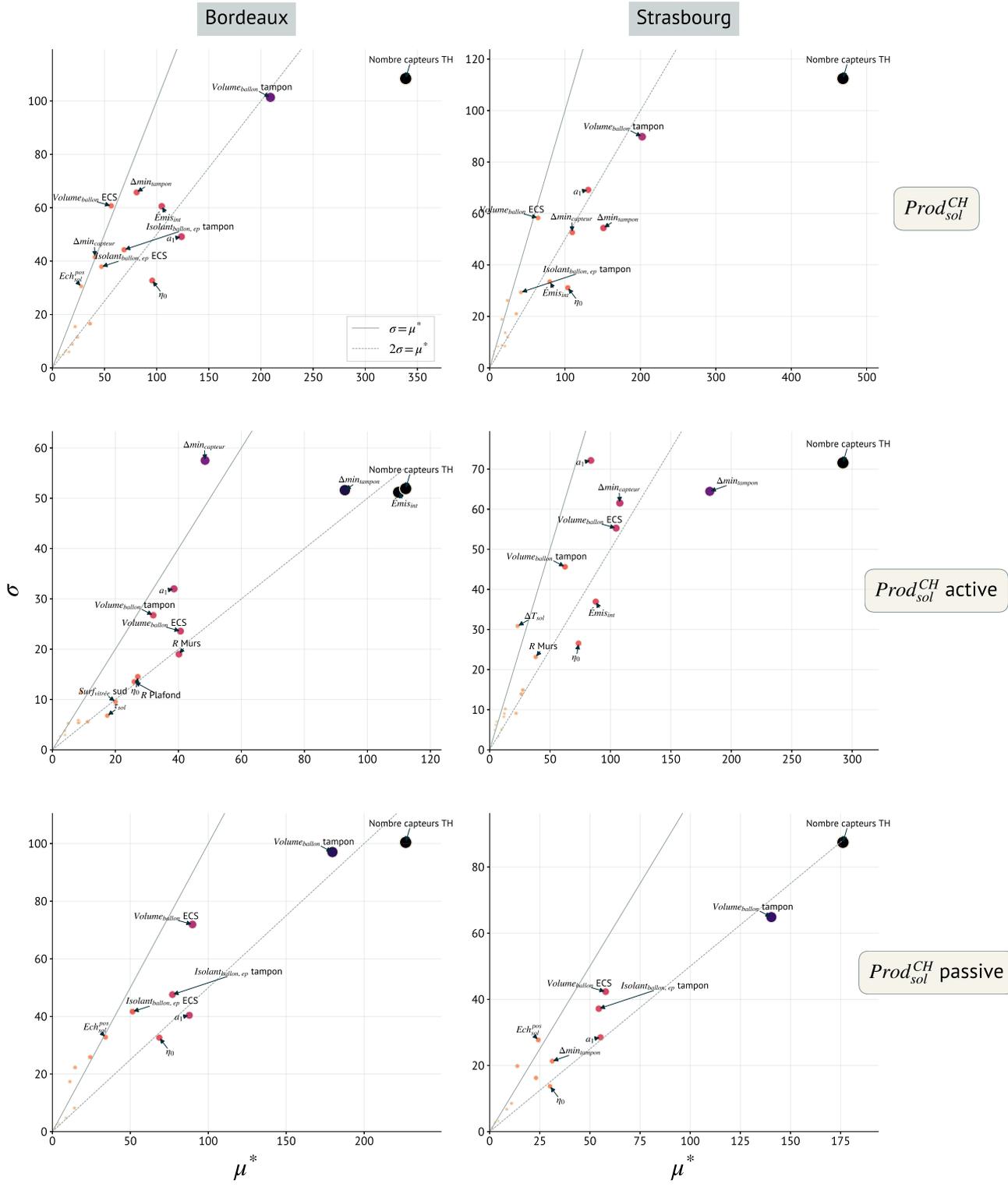


FIGURE F.2 – Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{CH}$ ($f(\mu^*) = \sigma$).

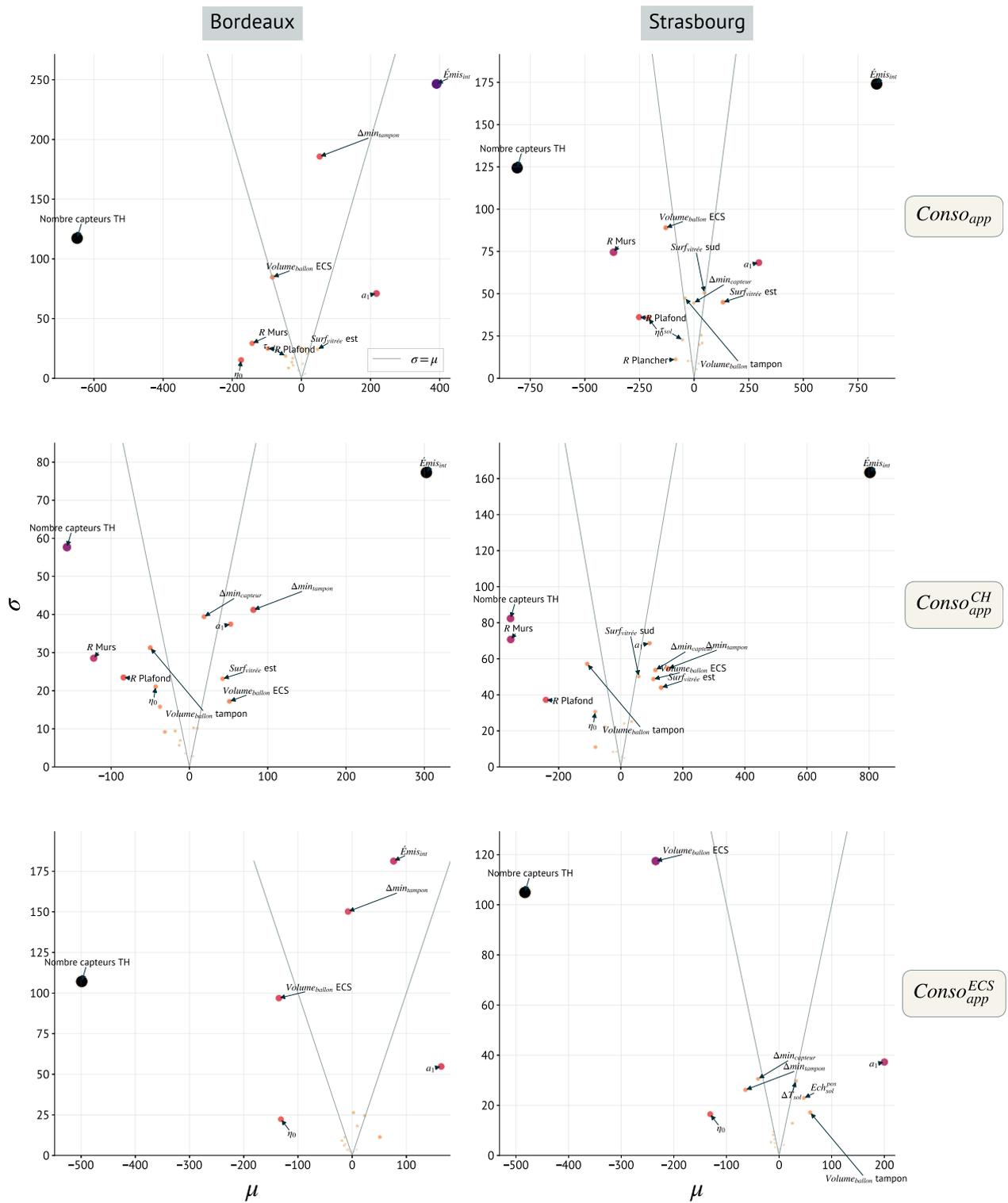


FIGURE F.3 – Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la *Conso_{app}* ($f(\mu) = \sigma$).

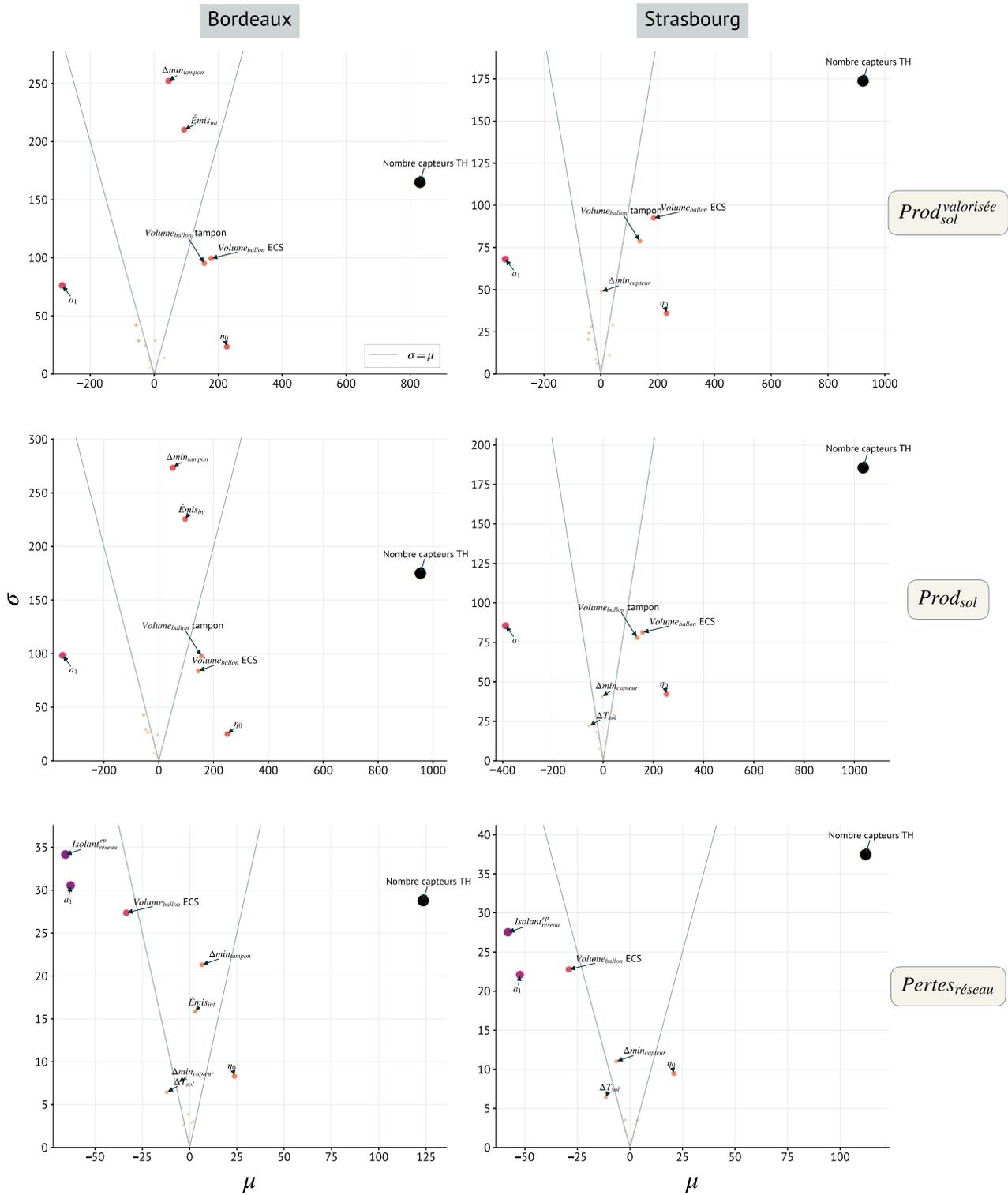


FIGURE F.4 – Résultat de l'analyse de Morris sur le détail de la $Prod_{sol}^{valorisée}$ ($f(\mu) = \sigma$).

CRÉATION DES MÉTA-MODÈLES

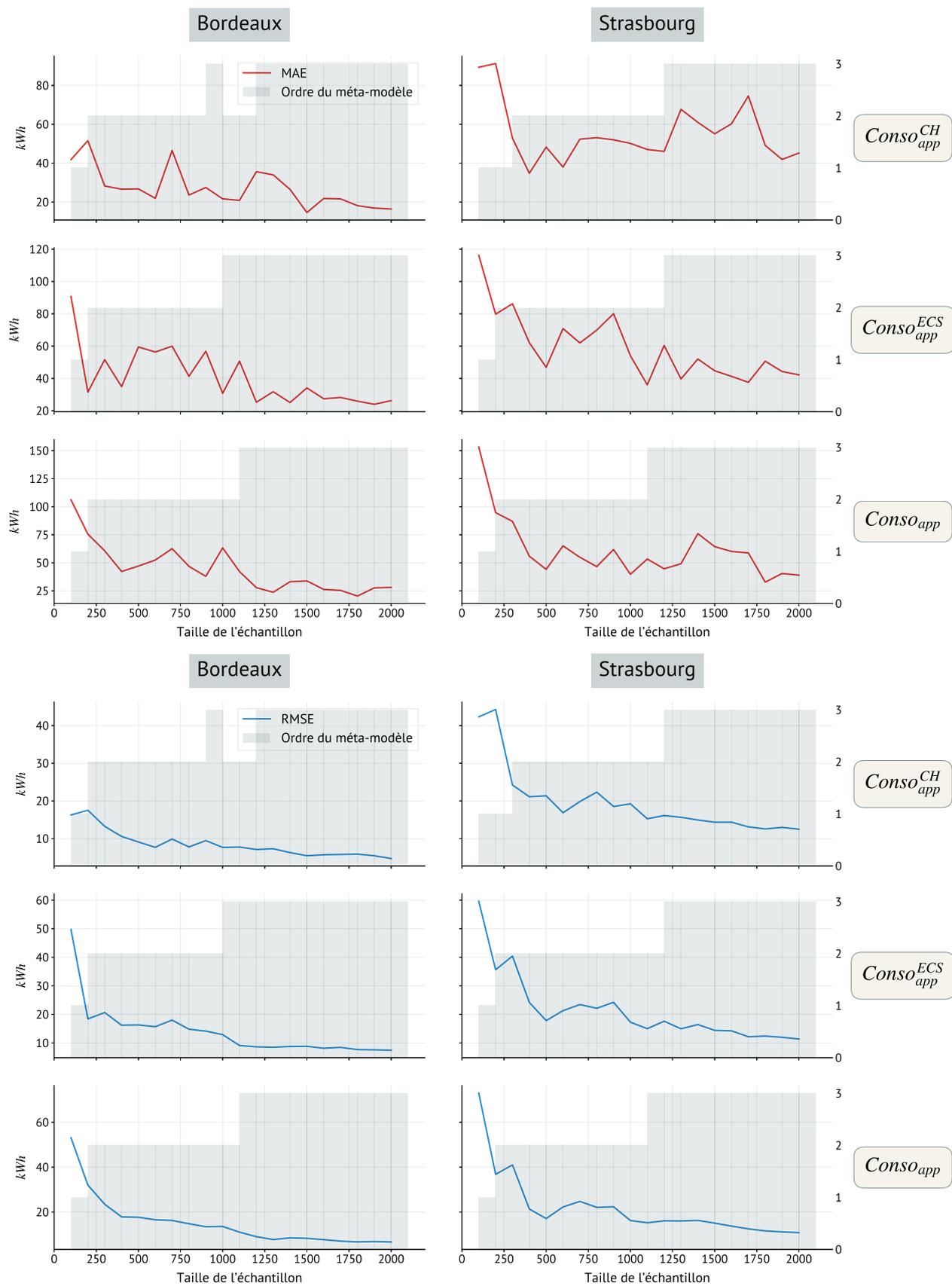


FIGURE G.1 – Évolution de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de l'erreur absolue maximale (MAE) pour le SSC en fonction de la taille de l'échantillon.

ANNEXE H

OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS

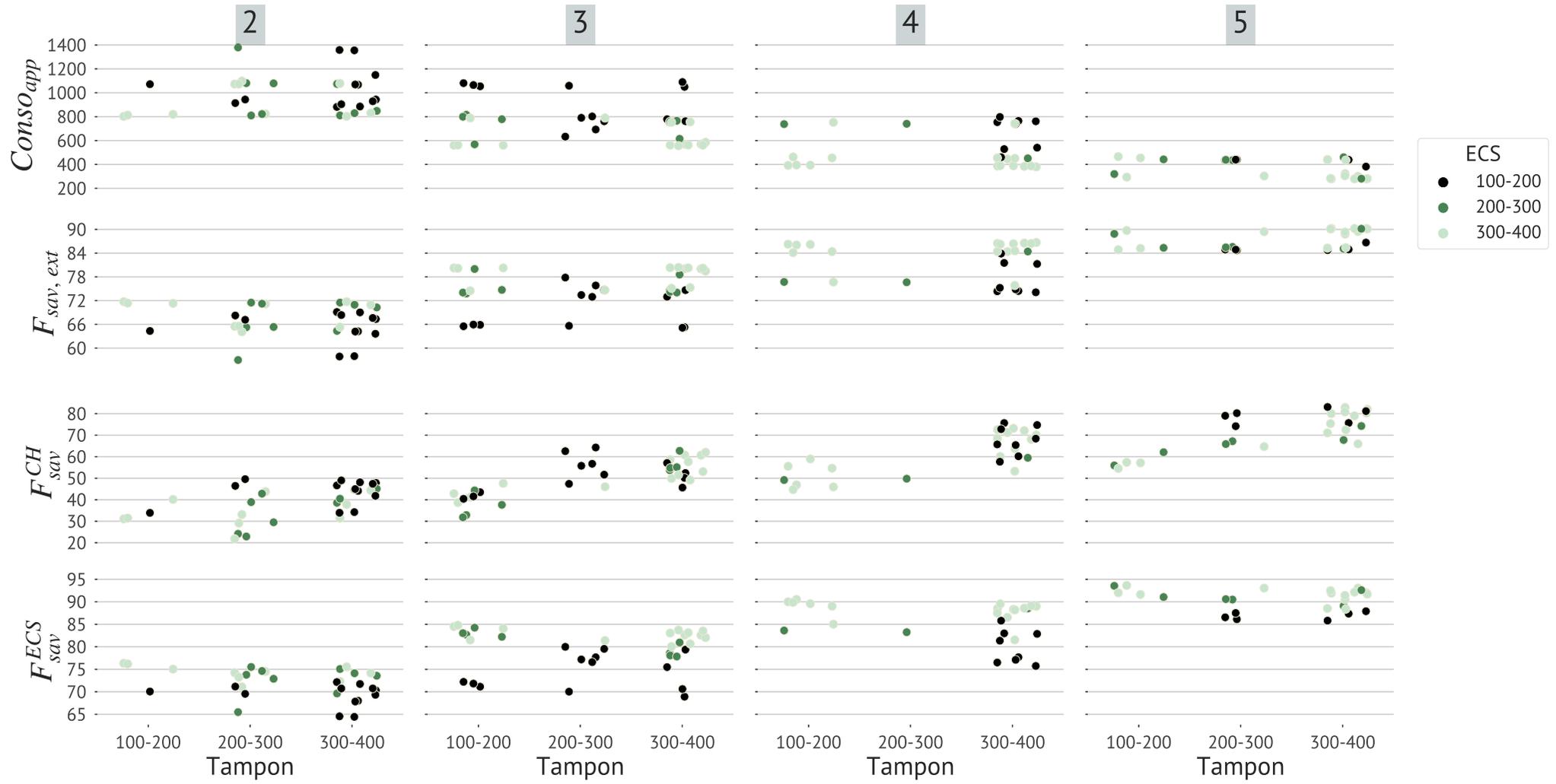


FIGURE H.1 – Répartition des solutions sur Bordeaux en fonction du volume des ballons pour 4 indicateurs : la $Conso_{app}$, le $F_{sav,ext}$, le F_{sav}^{CH} , et le F_{sav}^{ECS} .

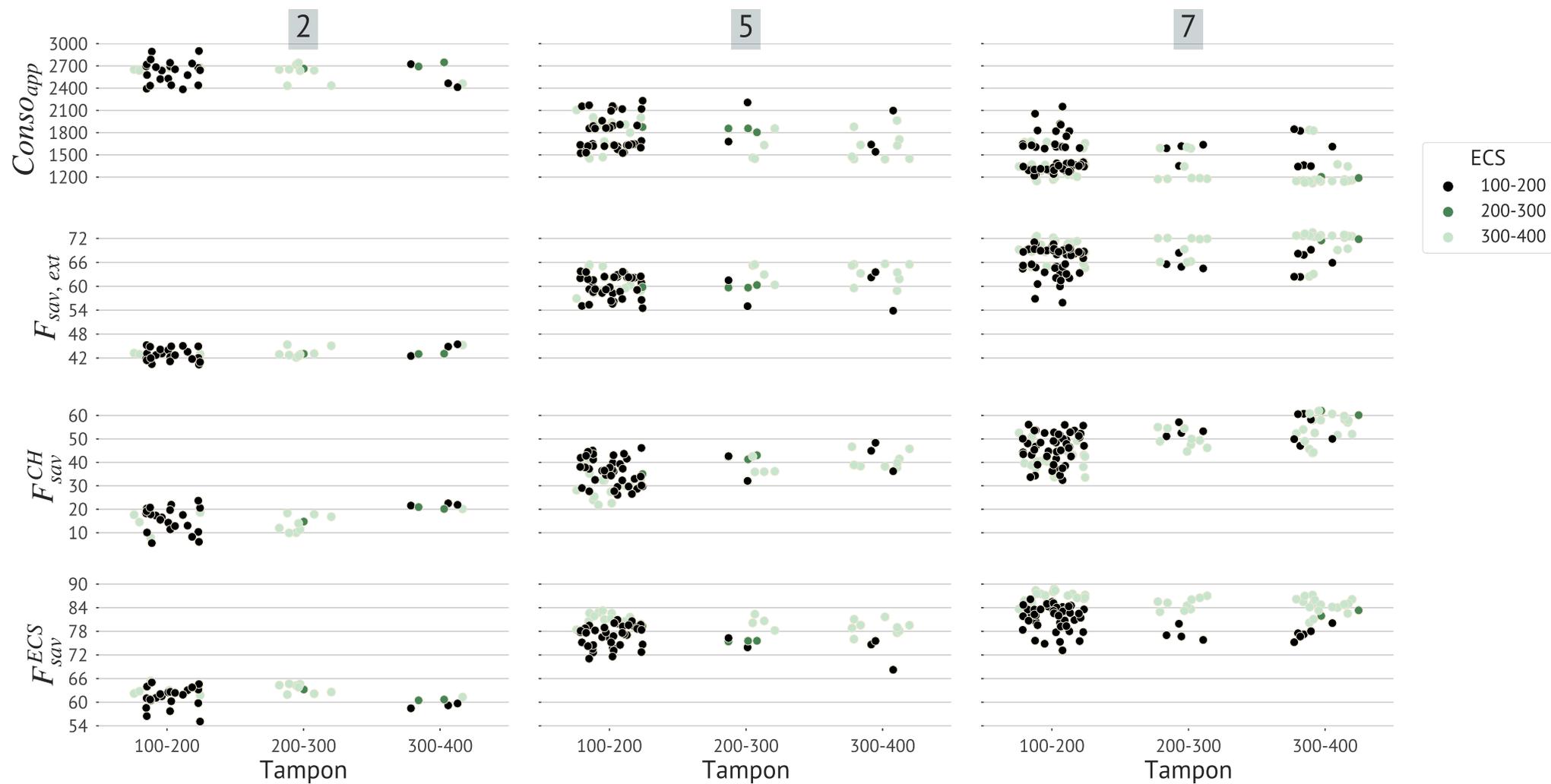


FIGURE H.2 – Répartition des solutions sur Strasbourg en fonction du volume des ballons pour 4 indicateurs : la $Conso_{app}$, le $F_{sav,ext}$, le F_{sav}^{CH} , et le F_{sav}^{ECS} . Représente les solutions cumulées de deux optimisations dont une n'autorisant qu'un faible volume pour les ballons.

