

THÈSE

présentée devant

l'Université de La Rochelle

UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : GENIE CIVIL

Ecole doctorale de La Rochelle

par

Fadi CHLELA

Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie

Directeur de thèse : Christian INARD

Co-encadreur : Ahmad HUSAUNNDEE
Peter RIEDERER

Soutenue le 05/02/2008 devant la Commission d'Examen composée de :

G. ACHARD	Professeur, Université de Savoie, France	Examineur
J. BRAU	Professeur, INSA de Lyon, France	Examineur
A. HUSAUNNDEE	Docteur, Veolia Environnement R&D, France	Examineur
C. INARD	Professeur, Université de La Rochelle, France	Examineur
J. L. IZARD	Architecte DPLG, ENSA Marseille, France	Examineur
D. MARCHIO	Professeur, Ecole de Mines de Paris, France	Rapporteur
P. RIEDERER	Docteur, CSTB, France	Examineur
M. SANTAMOURIS	Professeur, Université d'Athènes, Grèce	Rapporteur

A ma famille

Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans l'appui et le soutien de nombreuses personnes que je souhaite ici vivement remercier :

Monsieur Jean-Christophe Visier, chef du département Energie Santé Environnement du CSTB pour m'avoir accueilli dans son département et avoir assuré tous les moyens pour la réussite de ce travail.

Monsieur Jean-Robert Millet, responsable de la division Énergie, pour sa confiance, sa disponibilité et ses conseils pendant toute la durée de mon travail.

Monsieur Dominique Marchio, Professeur à l'école des Mines de Paris et Monsieur Mat Santamouris, Professeur à l'université d'Athènes pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Monsieur Jean Brau, Professeur à l'INSA de Lyon, Monsieur Gilbert Achard, Professeur à l'Université de Savoie et Monsieur Jean Louis Isard, Architecte DPLG à l'ENSA de Marseille, pour leurs intérêts manifestés à l'égard de mon travail et pour avoir assuré la tâche d'examiner ce mémoire.

Monsieur Christian Inard, mon directeur de thèse, pour sa confiance et son soutien tout au long de ce travail. L'appui scientifique, le soutien moral et sa disponibilité ont été essentiels pour la réussite de ce travail. En plus des qualités scientifiques, ce travail m'a permis d'apprécier les qualités humaines de Christian.

Monsieur Ahmad Husaunndee et Monsieur Peter Riederer, ingénieurs-chercheurs, pour leur confiance, le suivi de mon travail de doctorat et leurs qualités humaines et professionnelles.

Madame Mireille Jandon et Monsieur Hossein Vaezi-Nejad pour leur intérêt manifesté à l'égard de mon travail et pour leurs encouragements.

Monsieur Nabil Belkadi pour m'avoir fourni les plans d'architecture du bâtiment étudié dans ce travail.

Madame Caterina Joury, pour sa gentillesse, sa disponibilité et la mise en forme du manuscrit.

Nazila, Nicolas, Hind, Sana et Cristiana pour avoir créé une ambiance de travail agréable où il est bon de travailler.

Tous les membres des équipes PEB et AGE pour m'avoir permis de réaliser ce travail de la manière la plus agréable possible.

David et Noura pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce travail.

Et enfin, la famille Jarre et ma famille, pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

Résumé

En France, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi les secteurs économique, avec 43% de l'énergie finale totale et 25% des émissions de CO₂. Il s'avère donc nécessaire de réduire l'impact environnemental de ce secteur en promouvant la construction des bâtiments neufs et la rénovation thermique des bâtiments existants, selon les critères des bâtiments à basse consommation d'énergie.

L'objectif de ce travail est de développer une méthodologie pour réaliser des études de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. La méthodologie consiste à déterminer des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétique et du confort thermique d'été des bâtiments, à l'aide de la méthode des plans d'expériences et des outils de simulation numérique. Ces modèles polynômiaux permettent de simplifier les études paramétriques, en apportant une réponse alternative aux outils de simulations numériques pour la recherche de solutions afin de concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie. La méthodologie est appliquée sur un bâtiment tertiaire à savoir un immeuble de bureaux.

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art des bâtiments à basse consommation d'énergie et à énergie positive, dans le but de dresser un bilan de connaissances sur le contexte énergétique français, sur les labels mis en place en France et à l'étranger, sur les projets réalisés et sur les techniques utilisées pour concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie.

Ensuite, nous nous focalisons dans le second chapitre, sur le développement de modèles numérique nécessaires à l'élaboration de la méthodologie. Les modèles sont développés dans l'environnement MATLAB/SIMULINK et intégrés dans la bibliothèque SIMBAD, dédiée à la simulation numérique en thermique du bâtiment afin de participer à son développement. De plus, nous présentons des études d'évaluation énergétique de systèmes spécifiques aux bâtiments à basse consommation d'énergie qui illustrent l'utilisation des modèles numériques développés.

Un cas d'étude est défini dans le troisième chapitre ainsi que les contextes climatiques à considérer, les principes de base de la méthode des plans d'expériences et un exemple de son application. Le cas d'étude considéré est un immeuble de bureaux, nommé Beethoven, dont les caractéristiques de base seront choisies selon les exigences de la réglementation thermique. Ces caractéristiques constituent la configuration de référence qui est améliorée en suivant la méthodologie développée. L'analyse des huit zones climatiques définies par la réglementation thermique et l'évaluation des performances énergétiques du bâtiment pour la configuration de référence par rapport à ces climats, permettent de sélectionner trois climats représentatifs pour la suite du travail. Enfin, un exemple d'application de la méthode des plans d'expériences pour une optimisation énergétique de la configuration de référence permet de justifier le choix de cette méthode.

Le début du quatrième chapitre est consacré au développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétique et du confort thermique d'été du bâtiment

Beethoven. Nous débutons ce chapitre par une évaluation des limites de la méthode des plans d'expériences pour déterminer ces modèles polynômiaux. Il en découle une méthodologie générale d'application de la méthode des plans d'expériences afin de développer des modèles polynômiaux pour réaliser des études de conception de bâtiment à basse consommation d'énergie. Ensuite, nous effectuons, à l'aide de ces modèles, une étude de sensibilité pour le bâtiment Beethoven et une analyse de solutions pour concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie selon divers critères énergétiques.

Dans le dernier chapitre, nous présentons un exemple d'application des modèles polynômiaux développés pour identifier des solutions pour la conception de l'enveloppe et des systèmes du bâtiment Beethoven, afin d'obtenir un bâtiment à basse consommation d'énergie, selon les critères du label Français Effinergie et du label Allemand Passivhaus. Les configurations basse consommation d'énergie obtenues sont comparées par rapport à la configuration de référence en termes de performances énergétiques, de confort thermique d'été et d'émissions CO₂.

La méthodologie que nous proposons permet d'identifier, de manière simple et rapide, des solutions pour concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie. Les solutions sont sélectionnées à l'aide d'abaques définis avec les modèles polynômiaux développés. Le niveau de précision constaté par rapport à la simulation numérique est appréciable. Le choix des solutions est effectué parmi des millions de configurations de facteurs, déterminées à l'aide des modèles polynômiaux. La détermination de toutes ces configurations serait difficile voire impossible à réaliser directement à l'aide de la simulation numérique, sans avoir recours à des modèles polynômiaux, d'où l'avantage d'une telle méthodologie.

Enfin, cette méthodologie constitue une base robuste pour le développement d'outils d'aide à la décision, destinés aux différents acteurs du secteur du bâtiment pour la conception des bâtiments neufs et la rénovation thermique des bâtiments existants, selon les critères des bâtiments à basse consommation d'énergie.

Mots-clés : Bâtiments à basse consommation d'énergie, bâtiments à énergie positive, optimisation énergétique de bâtiments, méthodologie de conceptions de bâtiment, études paramétriques, plans d'expériences, outils d'aide à la décision, outils de simulation numérique.

Abstract

The building sector represents the most energy consuming sector in France with 43% of final energy consumption and 25% of greenhouse gases emission. Thus, efforts should be taken to promote new buildings construction and existent buildings thermal renovation satisfying low energy building criterions.

The main target of this work is to set up a methodology to carry out parametrical studies during the design process of a low energy building. The methodology consists of using numerical simulation tools and the design of experiments method (DOE) to develop polynomial models to evaluate the energy efficiency and summer thermal comfort of buildings. The polynomial models simplify parametrical studies by replacing numerical simulation tools to find out solutions to get to low energy buildings. The methodology is used to improve the energy efficiency of a small typical French office building, called Beethoven, to achieve a low energy building suitable for the French climate condition.

The first chapter presents the state of art of low energy buildings. The state of art work deals with low energy buildings labels and projects realization, as well as HVAC systems and building envelope concepts.

The second chapter treats with numerical models development in the MATLAB/SIMULINK environment and its integration in the SIMBAD models library. These models are useful to set up the methodology. A few studies carried out using the developed models to evaluate low energy buildings and HVAC systems performance, are also presented.

The third chapter deals with the presentation of the office building characteristics and the underlying principles of the design of experiments method. The thermal characteristics of the office building are chosen according to the French thermal regulation guidelines. These characteristics are considered as a reference configuration to evaluate the energy efficiency improvements of the low energy office building. The energy efficiency of the office building for the reference configuration is evaluated with respect to the eight climate contexts defined by the French thermal regulation. This ables us to retain only three representative climates to achieve this work. An application example of the design of experiments method is performed in order to validate the choice of this method for the design methodology.

The fourth chapter deals with the development of polynomial models. The potential and limits of the design of experiments method is evaluated to model the building energy efficiency and thermal comfort via polynomial models. This leads us to define an application strategy of the design of experiments method in the frame work of low energy building numerical design studies. Then, the polynomial models are used to perform a sensitivity analysis for energy efficiency of the office building as well as solutions analysis for building envelope and HVAC systems in order to get to a low energy building with respect to the three climates.

In the last chapter, the polynomial models are used to identify solutions for the office building envelope and HVAC systems characteristics in order to get to a low energy building with respect to the guidelines of the French label Effinergie and the German label Passivhaus.

The low energy configurations are compared to the reference configuration in terms of energy consumption, summer thermal comfort and CO₂ gases emission.

The developed methodology simplifies the parametric study to find out solutions to improve the energy efficiency of buildings, by performing graphical diagrams for solutions selection. It ables to study a large number of solutions, which could reach millions depending on the number of parameters. The methodology results show satisfying agreements with the numerical simulation results. Thus it could be used to develop design tools for low energy buildings construction and existent buildings thermal renovation.

Keywords: Low energy buildings, design methodology, building energy efficiency optimization, parametrical studies, design of experiments method, low energy building design tools, numerical simulation tools.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 - Etat de l'art des bâtiments à basse consommation d'énergie	3
1.1 Le contexte français.....	5
1.1.1 Politique énergétique	5
1.1.2 Consommations d'énergie du parc	8
1.1.3 Réglementation thermique.....	9
1.1.4 Labels	11
1.2 Etat de l'art des opérations internationales	13
1.2.1 Bâtiments performants.....	13
1.2.1.1 Les labels MINERGIE® et MINERGIE-ECO®	13
1.2.1.2 Exemples de réalisation	15
1.2.2 Bâtiments très performants.....	16
1.2.2.1 Le label MINERGIE-P®	17
1.2.2.2 Le label Passivhaus	18
1.2.2.3 Exemples de réalisations	19
1.2.3 Bâtiments zéro énergie ou à énergie positive	21
1.2.3.1 Exemples de réalisation	21
1.3 Etat de l'art des technologies	22
1.3.1 Enveloppe	23
1.3.2 Ventilation	25
1.3.2.1 Ventilation double flux avec récupération de chaleur.....	26
1.3.2.2 Puits climatique	27
1.3.2.3 Le free cooling.....	28
1.3.3 Systèmes et énergies renouvelables	29
1.3.3.1 Chaudière à condensation	29
1.3.3.2 Pompe à chaleur	30
1.3.3.3 Systèmes évaporatifs	31
1.3.3.4 Systèmes solaires	32
1.3.3.5 Unités compactes.....	36
1.3.3.6 Le bois – énergie.....	37
1.3.3.7 Les éoliennes	38
1.3.3.8 La micro-cogénération	38
1.3.4 Usages.....	39
1.4 Conclusion.....	40
Chapitre 2 - Développement de modèles numériques dans la bibliothèque SIMBAD ..	43
2.1 La bibliothèque SIMBAD.....	45
2.2 Le modèle de bâtiment multizone	46
2.2.1 Equations de base du modèle	46
2.2.1.1 Bilan thermique et hydrique d'une zone	46
2.2.1.2 Modélisation des parois opaques.....	48
2.2.1.3 Modélisation des baies vitrées	49
2.2.2 Modélisation des masques proches	50
2.2.2.1 Masques proches verticaux	50
2.2.2.2 Masque proche horizontal	51

2.2.2.3	Rayonnement global incident	52
2.2.3	Modélisation des infiltrations d'air	52
2.3	Modélisation des matériaux à changement de phase	53
2.4	Modélisation des échangeurs géothermiques	54
2.4.1	Modélisation de la température du sol	54
2.4.2	Modèle stationnaire continu	57
2.4.3	Modèle dynamique nodal	59
2.4.4	Comparaisons et validations	61
2.5	Le modèle d'échangeur à plaques air-air	63
2.6	Le modèle de pompe à chaleur	65
2.6.1	Modélisation du fonctionnement en mode refroidissement	65
2.6.2	Modélisation du fonctionnement en mode chauffage	66
2.7	Exemples d'applications	66
2.7.1	Rafrâichissement passif à l'aide de matériaux à changement de phase	67
2.7.2	Ventilation mécanique avec récupération de chaleur	70
2.7.3	Amélioration de l'efficacité énergétique d'une maison individuelle	73
2.8	Conclusion	76
Chapitre 3 - Description de la méthode des plans d'expériences et du cas d'étude		77
3.1	Description du cas d'étude	79
3.1.1	Généralités	79
3.1.2	Caractéristiques de l'enveloppe	80
3.1.3	Scenarios d'occupation	81
3.1.4	Caractéristiques des usages	82
3.1.5	Caractéristiques du système de ventilation	84
3.1.6	Caractéristiques de l'installation de climatisation	85
3.1.7	Evaluation des performances énergétiques	86
3.1.7.1	Introduction	86
3.1.7.2	Découpage en zones du bâtiment	87
3.1.7.3	Données météorologiques	87
3.1.7.4	Besoins énergétiques	89
3.1.7.5	Climats retenus	91
3.1.7.6	Performances énergétiques et émission de CO ₂	92
3.2	Description de la méthode des plans d'expériences	95
3.2.1	Introduction	95
3.2.2	Terminologie	96
3.2.3	Modélisation mathématique	98
3.2.4	Modélisation matricielle	98
3.2.5	Modélisation polynômiale	99
3.2.6	Modèle de l'expérimentateur	101
3.2.7	Système d'équations	102
3.2.8	Précision sur les coefficients	102
3.2.9	Précision sur les réponses prédites	103
3.2.10	Critères d'optimalité	103
3.2.11	Plans factoriels complets	104
3.2.12	Plans factoriels fractionnaire	106
3.2.12.1	Plans de Rechtschaffner	109
3.2.12.2	Plans de Plackett et Burman	109
3.2.12.3	Tables de Taguchi	109
3.2.13	Plans pour surface de réponse	110
3.2.13.1	Plans composites	110
3.2.13.2	Plans de Box-Behnken	112
3.2.13.3	Plans D-optimaux	113
3.3	Exemple d'application des plans d'expériences en thermique du bâtiment	113
3.3.1	Définition du problème	113
3.3.2	Modélisation à l'aide d'un plan D-optimaux	115
3.3.3	Synthèse et analyse	116
3.4	Conclusion	117

Chapitre 4 - Développement des modèles polynômiaux et analyses	119
4.1 Développement de modèles polynômiaux à l'aide de la méthode des plans d'expériences	121
4.1.1 Introduction	121
4.1.2 Description des facteurs et des réponses considérés	121
4.1.3 Description des plans d'expériences utilisés	124
4.1.4 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage	125
4.1.5 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement	132
4.1.6 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment	136
4.1.7 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation du confort thermique d'été	140
4.1.8 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne	143
4.1.9 Synthèse et définition d'une méthodologie générale d'application de la méthode des plans d'expériences	144
4.2 Analyse de sensibilité à l'aide des modèles polynômiaux développés.....	147
4.2.1 Introduction	147
4.2.2 Analyse de sensibilité pour les besoins de chauffage	149
4.2.3 Analyse de sensibilité pour les besoins de rafraîchissement.....	152
4.2.4 Analyse de sensibilité pour la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment ...	154
4.2.5 Analyse de sensibilité pour le confort thermique d'été.....	156
4.2.6 Analyse de sensibilité pour la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne	158
4.2.7 Synthèse et analyses	160
4.3 Analyse de solutions performantes à l'aide des modèles polynômiaux développés	160
4.3.1 Introduction	160
4.3.2 Analyse de solutions performantes pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement	162
4.3.3 Analyse de solutions performantes pour les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle	166
4.3.4 Analyse de solutions performantes pour la consommation d'énergie finale annuelle ...	171
4.4 Conclusion.....	173
Chapitre 5 - Exemple d'application des modèles polynômiaux pour concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie	175
5.1 Définition des objectifs visés pour la recherche de solutions basse consommation	177
5.2 Description de la démarche suivie pour la recherche de solutions basse consommation.....	177
5.3 Définition des intervalles de solutions pour les facteurs	179
5.4 Application pour Nancy	180
5.4.1 Choix de solutions pour les besoins de chauffage	180
5.4.2 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement.....	182
5.4.3 Choix des performances des systèmes de chauffage et de rafraîchissement	186
5.4.4 Comparaison avec la configuration de référence	188
5.4.5 Synthèse et analyse	190
5.5 Application pour Agen	191
5.5.1 Choix de solutions pour les besoins de chauffage	191
5.5.2 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation simple flux..	194
5.5.3 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation double flux .	197
5.5.4 Choix des performances des systèmes de chauffage et de rafraîchissement	199
5.5.5 Comparaison avec la configuration de référence	201
5.5.6 Synthèse et analyse	203
5.6 Application pour Nice	203
5.6.1 Choix de solutions pour les besoins de chauffage	203

5.6.2	Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation simple flux..	206
5.6.3	Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation double flux .	208
5.6.4	Choix des performances des systèmes de chauffage et de rafraîchissement	210
5.6.5	Comparaison avec la configuration de référence	212
5.6.6	Synthèse et analyse	213
5.7	Conclusion	214
	Références bibliographiques	219
	Annexe A1 : Caractéristiques de l'installation de climatisation de la configuration de référence	229
	Annexe A2 : Exemple d'application des tables de Taguchi	233
	Annexe A3 : Table $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi	237
	Annexe A4 : Table $L_{64}(2^{63})$ de Taguchi	239
	Annexe A5 : Table $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi	241
	Annexe A6 : Plan de Box-Behnken pour 11 facteurs	243
	Annexe A7 : Plan D-optimaux pour 11 facteurs	245
	Annexe A8 : Plan D-optimaux pour 13 facteurs	247
	Annexe A9 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage	249
	Annexe A10 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement	253
	Annexe A11 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment	259
	Annexe A12 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation du confort thermique	265
	Annexe A13 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne	273
	Annexe A14 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage et de la consommation d'énergie finale annuelle avec la ventilation double flux	279

Nomenclature

A	surface, (m ²)
a	diffusivité thermique, (m ² /jour)
A _t	surface totale des parois intérieures de la zone, (m ²)
Az	azimuth, (°)
C _p	capacité calorifique, (J/kgK)
C _p	coefficient de pression du vent, (-)
C _d	facteur de correction de la puissance calorifique, (-)
C	consommation d'énergie, (kWh/m ² .an)
B	besoins d'énergie, (kWh/m ² .an)
C _{cp}	coefficient de fonctionnement à charge partielle, (-)
COP	coefficient de performance, (-)
COP _g	coefficient de performance global du système de chauffage, (-)
D	diamètre, (m)
d	distance entre deux nœuds, (m)
d _h	hauteur de l'ombre dû au masque proche horizontal, (m)
d _{hm}	largeur du masque proche horizontal, (m)
d _{vg}	largeur du masque proche vertical gauche, (m)
d _{vd}	largeur du masque proche vertical droit, (m)
d _{lg}	largeur de l'ombre dû au masque proche vertical gauche, (-)
d _{ld}	largeur de l'ombre dû au masque proche vertical droit, (-)
EER	efficacité de la pompe à chaleur en mode froid, (-)
EER _g	efficacité globale du système de rafraîchissement, (-)
f _{diff1}	facteur d'affaiblissement du rayonnement solaire diffus dû au masque proche horizontal, pour la partie protégée de la fenêtre, (-)
f _{diff2}	facteur d'affaiblissement du rayonnement solaire diffus dû au masque proche horizontal, pour la partie non protégée de la baie, (-)
f _{vg}	facteur d'affaiblissement du rayonnement solaire direct dû au masque proche vertical gauche, (-)
f _{vd}	facteur d'affaiblissement du rayonnement solaire direct dû au masque proche vertical droit, (-)
f _{h1}	facteur d'affaiblissement du rayonnement solaire direct dû au masque proche horizontal, pour la partie protégée de la fenêtre, (-)
f _{h2}	facteur d'affaiblissement du rayonnement solaire direct dû au masque proche horizontal, pour la partie non protégée de la fenêtre, (-)
g	accélération de la pesanteur, (m ² /s)
G	source de vapeur d'eau, (kg eau/s)
h	coefficient d'échange superficiel, (W/m ² K)
h _{p1}	hauteur de la partie protégée de la baie, (m)
h _{p2}	hauteur de la partie non protégée de la baie, (m)
H ₀	hauteur du composant par rapport au sol, (m)
H _z	hauteur du composant par rapport au plancher de la zone, (m)
H	profondeur totale active du capteur enterré vertical, (m)
I _D	rayonnement solaire direct, (W/m ²)

I_d	rayonnement solaire diffus, (W/m ²)
I_r	rayonnement solaire réfléchi par le sol, (W/m ²)
I_{sr1}	rayonnement solaire global atteignant la partie protégée de la baie, (W/m ²)
I_{sr2}	rayonnement solaire global atteignant la partie non protégée de la baie, (W/m ²)
J	jour de l'année, (1...365)
J_0	déphasage (jour de l'année correspondant à la température de surface minimale, (1...365))
L	longueur, (m)
l_p	largeur de la fenêtre, (m)
$\dot{m}$	débit massique, (kg/s)
M	module d'entrée d'air, (m ³ /h)
Nu	nombre de Nusselt, (-)
NUT	nombre d'unité de transfert, (-)
nb_w	nombre de baie dans la zone (-)
P	pression, (Pa)
P_f	puissance frigorifique, (W)
P_c	puissance calorifique, (W)
P_a	puissance électrique absorbée, (W)
Pr	nombre de Prandtl, (-)
q	puissance, (W)
R	résistance thermique linéique, (mK/W)
r	rayon, (m)
r_e	rayon extérieur du tube enterré, (m)
Re	nombre de Reynolds, (-)
R_{ef}	coefficient moyen (pondération par les surfaces) du coefficient de réflexion lumineux des parois intérieures, (-)
r_{und}	rayon de la couche adiabatique, (m)
r_i	rayon intérieur du tube enterré, (m)
T	température, (°C)
T_{moy}	moyenne annuelle de la température de surface, (°C)
T_{amp}	amplitude annuelle de la température de surface, (°C)
t	temps, (s)
U	coefficient de transmission thermique, (W/m ² K)
UA	coefficient d'échange global, (W/K)
U_g	coefficient de transfert global entre l'air et le sol, (W/mK)
V	volume, (m ³)
v	vitesse du vent, (m/s)
x	abscisse, (m)
z	profondeur, (m)

Symboles Grecs

α	coefficient d'absorption, (-)
λ	conductivité thermique, (W/mK)
γ	hauteur du soleil, (°)
τ	coefficient de transmission du rayonnement solaire de la baie, (-)
ξ	coefficient de perte de charge, (-)
ρ	masse volumique, (kg/m ³)
ω	humidité spécifique de l'air, (kg eau/kg air sec)
Φ	flux de chaleur, (W/m ²)
Ψ	coefficient de transmission linéique, (W/mK)
ε	efficacité, (-)
θ_{lg}	angle sous lequel la partie protégée de la baie voit le soleil
θ_{lg}	angle sous lequel la partie non protégée de la baie voit le soleil
Δ	différence

Indices

a	air, ou nœud a
ae	air extrait
an	air neuf
atm	atmosphérique
baie	baie
b	nœud b
c	composant, ou nœud c
CLO	courte longueur d'onde
conv	convectif
cp _{gl}	couplage
ec	entrée condenseur
ee	entrée évaporateur
ext	extérieur
extr	extrait
F	finale
f	fluide
fl	pleine charge
GLO	grande longueur d'onde
gc	gain convectif
i	zone i
inf	infiltration
ij	de la zone i vers la zone j
int	intérieur
in	entrée
j	zone j
max	maximum
min	minimum
n	nombre de zone
nom	nominale
nue	partie non protégée de la baie vitrée
out	sortie
op	operative
protégée	partie protégée de la baie vitrée
prot	protection
p	paroi
rad	radiatif
rm	radiante moyenne
s	surface
se	sortie évaporateur
sc	sortie condenseur
sol	sol
soleil	soleil
pt	pont thermique
tot	total
tube	tube
vent	ventilation
w	eau
z	zone
0	angle d'incidence du rayonnement solaire = 0
1	face 1
2	face 2

Introduction générale

Les émissions de gaz à effet de serre sont considérées comme la cause principale du réchauffement climatique des cinquante dernières années. Le Sommet de la Terre, à Rio en 1992, a marqué la prise de conscience internationale de ce risque. Les états les plus riches, pour lesquels une baisse de croissance semblait plus supportable et qui étaient en outre responsables des émissions les plus importantes, y avaient pris l'engagement de stabiliser en 2000 leurs émissions au niveau de 1990. C'est le Protocole de Kyoto, en 1997, qui traduit en engagements quantitatifs juridiquement contraignants cette volonté.

A la suite de cet accord, l'Union européenne a estimé nécessaire de procéder à une répartition de la charge de cet objectif entre les États membres. Ainsi, à l'horizon 2008-2012, la France devrait stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre à leur niveau de 1990. De plus, les pouvoirs publics ont proposé le 15 février 2005, date de l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto, de diviser par 4 d'ici 2050 les émissions des gaz à effet de serre. Ils ont confirmé l'engagement de la France en ce sens, affiché dans le Plan Climat de 2004. Ces promesses se traduisent par une forte réduction des consommations d'énergie dans les différents secteurs d'activités humaines, c'est-à-dire, le transport, l'industrie et le bâtiment.

Plus récemment en octobre 2007, les pouvoirs publics ont réaffirmé la volonté de la France d'agir contre le réchauffement climatique en annonçant à la fin du Grenelle de l'environnement, une série de programmes ambitieux visant à réduire l'impact environnemental des activités humaines au niveau de la France. Concernant le secteur du bâtiment, il a été prévu de généraliser les constructions de bâtiments à basse consommation d'énergie à l'horizon 2012 et de lancer un chantier de rénovation thermique des bâtiments existants.

La réduction des consommations d'énergie est urgente, non seulement pour des raisons écologiques, mais aussi pour des raisons économiques. A l'horizon 2050, on a estimé que la terre sera peuplée de 8 à 10 milliards de personnes, qui auront tous besoin de consommer de l'énergie pour se chauffer, se déplacer, etc. Un accroissement de la demande énergétique est inévitable. En revanche, l'augmentation des ressources énergétiques est moins sûre. La découverte des nouveaux gisements s'est ralentie. Ainsi, les experts estiment que, sur la base de la consommation 2002, les ressources de pétrole et de gaz dureront encore 50 ans. Si on poursuit les schémas actuels, une crise énergétique est très probable.

Les chiffres publiés par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) montrent qu'en France, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, avec 43 % de l'énergie finale totale. Cette énergie consommée représente 25 % des émissions de CO₂. Pour réduire dans un premier temps puis annuler l'impact du bâtiment, le CSTB a lancé des actions de recherche sur les bâtiments à basse consommation d'énergie. L'objectif de la recherche est d'élaborer des solutions concernant la conception de l'enveloppe et les systèmes de génie climatique afin d'aboutir à ce type de bâtiments.

Le choix d'une solution parmi d'autres dépend de nombreux facteurs, à savoir le contexte climatique en question, les performances énergétiques visées, le niveau exigé de confort thermique, acoustique, visuel et de qualité d'air, ainsi que des contraintes technico-économiques, architecturales et environnementales. Le processus de conception d'un bâtiment à basse consommation d'énergie comprend souvent une étude paramétrique permettant d'identifier la ou les solutions optimales permettant d'atteindre les objectifs visés en termes de performance énergétique et de confort thermique pour le contexte climatique en question.

Réaliser de telles études paramétriques peut s'avérer difficile, surtout si le nombre de paramètres à considérer est important. Il devient donc nécessaire de disposer d'une méthodologie permettant de mener à bien ce type d'études de façon simple, rapide et efficace.

C'est dans ce contexte que ce travail a été mené. Il vise à développer une méthodologie pour réaliser des études paramétriques de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. La méthodologie consiste à déterminer à l'aide de la simulation numérique et la méthode des plans d'expériences des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétiques et du confort thermique d'été des bâtiments. Ces modèles polynômiaux constituent une alternative à la simulation numérique, dans la recherche de solutions pour concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie, ce qui va simplifier de manière considérable la réalisation des études paramétriques.

Le mémoire est composé de cinq chapitres. Le contexte et la politique énergétique française est abordé au début du premier chapitre. Ceci est suivi par l'état de l'art des bâtiments à basse consommation d'énergie. Cet état de l'art traite des labels de bâtiments performants et des solutions concernant les méthodes de conception de l'enveloppe et les systèmes spécifiques à ce type de bâtiments.

Le chapitre II traite du développement de modèles numériques représentatifs des solutions identifiées par l'état de l'art et qui sont nécessaires pour mener à bien ce travail. Le développement est effectué dans l'environnement MATLAB/SIMULINK, afin d'enrichir la bibliothèque SIMBAD dédiée à la simulation numérique en thermique du bâtiment.

Le début du chapitre III est destiné à la présentation du cas d'étude qui est un immeuble de bureaux nommé Beethoven. Ensuite, nous présentons les principes de base de la méthode des plans d'expériences et un exemple d'application de cette méthode dans le cadre d'une étude d'optimisation énergétique du bâtiment Beethoven.

Le chapitre IV est consacré au développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétiques et du confort thermique d'été du bâtiment Beethoven. Ensuite, ces modèles sont mis en œuvre pour réaliser une étude de sensibilité et une analyse de solutions pour ce bâtiment, afin d'obtenir un bâtiment à basse consommation d'énergie.

Le dernier chapitre illustre la mise en œuvre des modèles polynômiaux développés pour identifier des solutions pour le bâtiment Beethoven dans le but de concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie respectant les exigences de deux labels de bâtiments performants présentés dans le chapitre I.

Chapitre 1

Etat de l'art des bâtiments à basse consommation d'énergie

En France, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, soit 43% de l'énergie finale totale. Cette énergie consommée entraîne l'émission de 120 millions de tonnes de CO₂ représentant 25% des émissions nationales et 32,7 millions de tonnes de carbone. Ceci montre que ce secteur conserve encore d'importantes marges d'amélioration de ses capacités en matière d'économies d'énergies (ADEME, 2005).

Un état de l'art sur les bâtiments à basse consommation d'énergie, en France et à l'étranger, a été réalisé afin de conduire à un bilan des connaissances pour ce qui concerne les projets réalisés, les techniques utilisées et les relations entre les acteurs (Chlela et al 2005). Suivant leurs niveaux de performances énergétiques, les bâtiments ont été classés en trois familles : bâtiments performants, bâtiments très performants et bâtiments zéro énergie ou à énergie positive.

Il existe une multitude d'opérations (programmes de recherche, labels, réalisations), pour chaque famille. Ces opérations sont fréquemment basées sur la définition de concepts de bâtiments. Ces concepts définissent à la fois un niveau de performance à atteindre et des exemples de solutions permettant d'atteindre ce niveau. Elles partent d'une même analyse du bilan énergétique orientée par la triade : réduire les besoins énergétiques, utiliser des énergies renouvelables, produire le complément d'énergie de façon efficace. On a donc systématiquement une approche portant sur (CSTB, 2006) :

- l'isolation des parois et la réduction des ponts thermiques, la conception d'une enveloppe bien étanche et le remplacement d'une aération non maîtrisée par un système de ventilation avec récupération de chaleur,
- le confort thermique d'été : traité par des solutions passives qui sont associées dans certains cas, à des systèmes de refroidissement performants,
- le recours à une conception architecturale bioclimatique et à des sources d'énergies renouvelables pour la production d'énergie, comme le solaire, l'air, l'eau, la géothermie et le bois,

- l'utilisation de générateurs d'énergie à haute efficacité et la réduction des pertes de distribution.

Les différences essentielles entre les programmes portent sur :

- le niveau d'ambition visé en matière de performance énergétique : modéré dans certains programmes, élevé ou très élevé dans d'autres,
- le traitement des consommations d'électricité : peu présent dans certains programmes et central dans les programmes intégrant le photovoltaïque,
- une orientation marquée sur le neuf ou une prise en compte des problématiques de réhabilitation,

Dans ce chapitre, la politique, le contexte énergétique, la réglementation thermique et les labels français, sont présentés ainsi que des opérations internationales et des technologies concernant les bâtiments à basse consommation d'énergie. Enfin, une synthèse générale est réalisée, permettant ainsi de mettre en évidence les méthodes de conception de l'enveloppe et les systèmes spécifiques des bâtiments à basse consommation d'énergie.

1.1 Le contexte français

Divers acteurs français, publics et privés, se sont mobilisés pour réduire l'impact environnemental du bâtiment. En effet, le secteur du bâtiment constitue une des clés permettant de résoudre le défi environnemental, car il offre des possibilités d'évolution importantes en matière d'énergie (ADEME, 2007) :

- Les bâtiments peuvent utiliser plusieurs sources d'énergie, dont les énergies renouvelables. Ces énergies peuvent être combinées. Elles peuvent, le cas échéant, changer plusieurs fois sur la durée de vie du bâtiment.
- Les travaux d'amélioration des performances énergétiques des bâtiments peuvent être programmés sur plusieurs années et cette évolution renforce à chaque fois la valeur patrimoniale du bien.
- Les occupants des bâtiments ont des comportements d'usage relativement constants au cours du temps. Leurs besoins évoluent sur des cycles longs, sans rupture brutale, et peuvent raisonnablement être anticipés.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser au contexte français en termes de politique énergétique, consommations d'énergie du parc et réglementation thermique. De plus, nous allons présenter les différents labels et certifications concernant les bâtiments à basse consommation d'énergie.

1.1.1 Politique énergétique

Dans le cadre du protocole de Kyoto, la France s'est engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre, à l'horizon de 2050. Cet objectif a été inscrit dans (ADEME, 2007) :

- la Stratégie nationale de développement durable présentée en juin 2003,
- le Plan climat présenté en juillet 2004,
- la Loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique.
- Le Grenelle de l'environnement en octobre 2007.

Le Plan climat : Il a été présenté en juillet 2004 et doit être actualisé tous les deux ans. C'est le plan d'action du gouvernement pour respecter, voire dépasser légèrement, l'objectif du protocole de Kyoto. Il regroupe toutes les mesures visant à économiser 54 millions de t_{eq}CO₂ par an en 2010 et définit une stratégie de recherche technologique afin de contribuer à la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (Plan climat, 2004) (voir Figure 1.1).

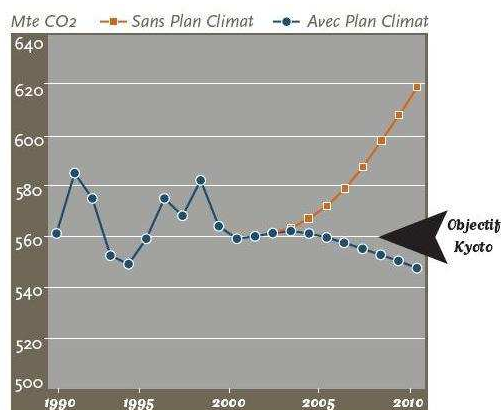


Figure 1.1 : Prévision de l'évolution des émissions de CO₂ sans et avec le plan climat (Plan climat, 2004)

Les actions concernant le secteur du bâtiment sont inscrites principalement dans le Chapitre « Bâtiment et écohabitat » et "Climatisation durable". Elles concernent :

- L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments : une amélioration de 15% de la performance énergétique globale dès 2005 avec un objectif d'amélioration de 40% d'ici à 2020. Cet objectif sera atteint en renforçant, au fur et à mesure, les exigences de la réglementation thermique.
- La mise en application d'une réglementation pour les bâtiments réhabilités ou rénovés.
- La création d'un diagnostic de performance énergétique des bâtiments (DPE).
- La mise en place de certificats d'économie d'énergie, de crédits d'impôts, d'aides publiques ciblées sur la performance énergétique.
- La mise en œuvre d'un outil statistique et de suivi.
- la création du PREBAT : programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans les bâtiments.
- La minimisation des impacts énergétiques dus à la climatisation.

La Loi de programme sur les orientations de la politique énergétique : Adoptée le 13 juillet 2005, elle contient au total 110 articles définissant quatre grands objectifs de politique énergétique française et les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre (ADEME, 2007) :

- Contribuer à l'indépendance énergétique nationale et garantir la sécurité d'approvisionnement ;
- Assurer un prix compétitif de l'énergie ;
- Préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre ;
- Garantir l'adhésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie.

Avec cette Loi, la France se donne des objectifs chiffrés à travers un certain nombre de programmes mobilisateurs :

- la réduction en moyenne de 2 % par an d'ici à 2015 de l'intensité énergétique finale (rapport entre la consommation d'énergie et la croissance économique) et de 2,5 % d'ici à 2030.
- la production de 10 % des besoins énergétiques français à partir de sources d'énergies renouvelables à l'horizon 2010 :
 - Une production intérieure d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21 % de la consommation en 2010 contre 14 % actuellement, soit + 50 % ;
 - Le développement des énergies renouvelables thermiques pour permettre d'ici 2010 une hausse de 50% de la production de chaleur d'origine renouvelable ;
 - L'incorporation de biocarburants et autres carburants renouvelables à hauteur de 2 % d'ici au 31 décembre 2005 et de 5,75 % d'ici au 31 décembre 2010 ;

- La mise en œuvre de plans mobilisateurs pour les économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables

Enfin, une place toute particulière est réservée aux actions de recherche et développement sur les nouvelles technologies de l'énergie. Une stratégie nationale de recherche sera publiée par le Gouvernement et révisée tous les 5 ans.

La directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB) : La loi de programme sur les orientations de la politique énergétique contient des mesures pratiques pour amorcer la réalisation des objectifs fixés. Parmi ces mesures pratiques, on retrouve la transposition des dispositions législatives de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB). Cette directive s'applique aux Etats membres et leur a imposé de mettre en application les dispositions législatives, réglementaires et administratives qu'elle contient au plus tard le 4 janvier 2006. Les exigences concernent (EPBD, 2002) :

- La disponibilité d'une méthode de calcul de la performance énergétique des bâtiments qui devra être exprimée clairement et pourra être complétée par un indicateur d'émission de CO₂ (article 3).
- Des exigences minimales en matière de performance énergétique (article 4), revues tous les cinq ans, pour les bâtiments neufs (article 5) et les bâtiments existants de surface supérieure à 1000 m² (article 6).
- Des études de faisabilité technique, environnementale et économique pour les bâtiments neufs (article 5) de taille supérieure à 1000 m², portant sur des systèmes alternatifs d'approvisionnement en énergie.
- La mise en place d'un certificat de performance énergétique (article 7), dénommé en France "Diagnostic de performance énergétique (DPE)", comportant la consommation énergétique et des recommandations destinées à améliorer la rentabilité de la performance énergétique qui devra être fourni aux acheteurs et aux locataires pour les locaux faisant l'objet de transactions. Il sera également affiché de manière visible dans tous les locaux publics recevant du public, de surface supérieure à 1000 m².
- La mise en œuvre d'une inspection périodique des chaudières à combustibles de 20 à 100 kW (article 8) et des systèmes de climatisation de plus de 12 kW (article 9). La mise en place également d'une inspection ponctuelle des systèmes de chauffage de plus de 20 kW âgés de plus de 15 ans, suivie de recommandations de modifications possibles (article 8).
- La réalisation des diagnostics de performance énergétique, des inspections et des recommandations par des experts qualifiés et/ou agréés par les Etats membres (article 10).

Le grenelle de l'environnement : L'organisation du grenelle de l'environnement a visé à créer les conditions favorables à l'émergence de la nouvelle donne française en faveur de l'environnement. Il a réuni l'état et les représentants de la société civile afin de définir une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. Il a abouti à la fin du mois d'octobre 2007 à un plan d'action de 15 à 20 mesures concrètes (Grenelle, 2007).

Parmi les mesures opérationnelles concernant le secteur du bâtiment, nous pouvons citer à titre d'exemple, le lancement d'un chantier de rénovation thermique des bâtiments existants et la généralisation des bâtiments neufs à consommation d'énergie finale annuelle inférieure à 50 kWh/m².an à l'horizon 2012, et les bâtiments neufs à énergie positive à l'horizon 2020.

1.1.2 Consommations d'énergie du parc

Le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, soit 43% de l'énergie finale totale et 25% des émissions de CO₂. La consommation totale d'énergie finale du secteur résidentiel a atteint en 2005 la valeur de 459,8TWh, soit 68% de la consommation totale du parc. Celle du secteur tertiaire est de 218,5TWh. Le chauffage représente près de 2/3 de ces consommations d'énergie et la majeure partie des émissions de CO₂ en raison du contenu élevé en carbone des combustibles fossiles et de l'électricité utilisée lors des périodes très froides (ADEME 2005).

La consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de 30 % au cours des 30 dernières années du fait de l'accroissement du parc des bâtiments (+41 % de logements en 30 ans), de l'accroissement de la surface moyenne des logements, de l'augmentation du confort et de l'apparition de nouveaux besoins. Ces différents facteurs ont contribué à une forte augmentation de la consommation d'électricité utilisée pour l'électroménager, l'éclairage, la bureautique, le refroidissement, le renouvellement et le traitement de l'air, la cuisson, le séchage... (ADEME 2007).

Le secteur tertiaire se décompose en huit branches principales avec des activités de service très diversifiées. Entre 2002 et 2003, les consommations unitaires moyennes de l'ensemble des branches du tertiaire ont enregistré une baisse de 0,9% à 222kWh/m². La Figure 1.2 montre les consommations unitaires pour les différentes branches du secteur tertiaire. Tous les secteurs sans exception ont diminué leurs consommations unitaires (ADEME 2005).

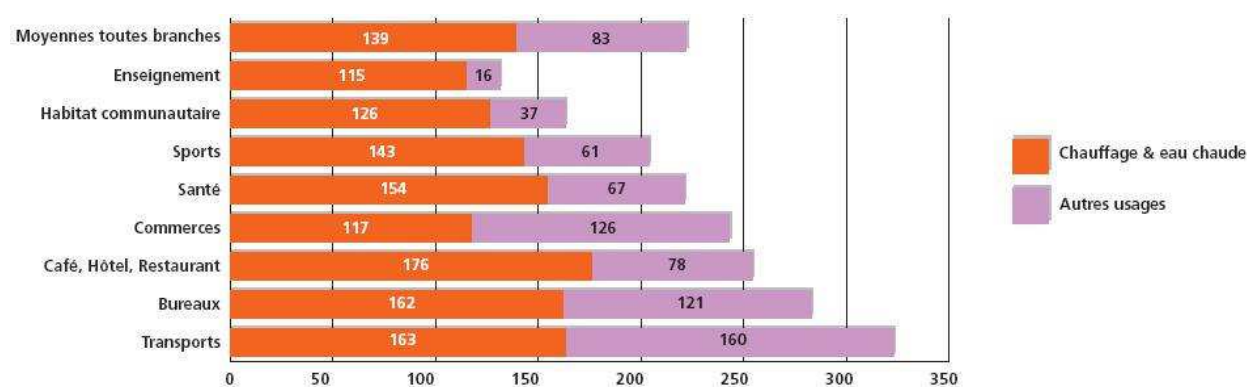


Figure 1.2 : Consommations unitaires annuelles du secteur tertiaire en 2003 en kWh/m²an et à climat normal (ADEME 2005)

Dans le secteur tertiaire, la superficie climatisée (chauffage + refroidissement) est de 839,3 millions de m² en 2003 contre 828,5 millions de m² en 2002 et 814,6 millions de m² en 2001. La consommation totale du secteur tertiaire s'est établie en 2001 à 214,1 TWh. Le Tableau 1.1 indique la répartition par branches des consommations d'énergie finale du secteur tertiaire pour l'année 2001 (ADEME 2007). Les deux premières branches par la taille, les commerces et les bureaux, sont les plus consommateurs d'énergie. Les cinq branches les plus consommatrices représentent plus de 80 % de la consommation totale.

Pour l'ensemble du secteur tertiaire, l'usage chauffage représente encore, comme dans le résidentiel mais dans une moindre mesure, le premier poste de consommation avec 54 % de la consommation totale. Le second poste recouvre les usages spécifiques de l'électricité (26 %). La climatisation représente environ 5 % de la consommation totale du secteur (ADEME 2007) (voir Tableau 1.2).

Activité ⁽¹⁾	Parcs Millions de m ²	Consommations TWh
Commerces	188,3	49,7
Bureaux	172,8	51,2
Enseignement	166,4	26,6
Santé, action sociale	93,9	26,6
Sports, loisirs	61,1	17
CAHORE ⁽²⁾	54,3	22,6
Habitat communautaire	53,5	12,3
Transports ⁽³⁾	24,3	8,7
Total	814,6	214,1

(1) Hors armées, artisanat, grands établissements publics de recherche et éclairage public
(2) CAHORE = Cafés, Hôtels, Restaurants
(3) Gares & aéroports

Tableau 1.1 : Répartition par branche des consommations d'énergie finale du secteur tertiaire en 2001

Activité	Consommations d'énergie (TWh)					Total
	Chauffage	ECS	Cuisson	Electricité spécifique	Refroidissement	
Commerces	22,2	2,9	1,1	20,5	2,9	49,7
Bureaux	28,5	1,4	0,8	16,3	4,2	51,2
Enseignement	19,9	2,4	1,6	2,3	0,3	26,6
Santé, action sociale	14,9	3,7	1,2	5,3	1	26,6
Sports, loisirs	9,1	3,8	0,4	2,9	0,8	17
CAHORE	9,8	2,6	5,9	3,3	0,9	22,6
Habitat communautaire	7	2,1	1,3	1,9	0,1	12,3
Transports	4	0,5	0,2	3,8	0,1	8,7
Total	115,4	19,4	12,7	56,3	10,3	214,1
Parts en %	54	9	6	26	5	100

Tableau 1.2 : Consommations énergétiques finales par usage pour le secteur tertiaire en 2001

La majeure partie de l'électricité consommée dans le secteur tertiaire sert à alimenter des usages captifs. Pour ce qui concerne la climatisation, la consommation totale d'électricité imputable à cet usage est estimée à 10,3 TWh/an (ADEME 2007).

Suite à la canicule de l'été 2003, le taux de climatisation des surfaces autorisées en 2004 progresse de 3 points pour atteindre un taux d'équipement de 33%. Sur les 14,5 millions de m² de surfaces neuves, on recense 4,84 millions de m² de surfaces rafraîchis. 35% des bureaux et 33% des commerces neufs sont rafraîchis. Ces deux branches représentent à elles seules plus des deux tiers des surfaces rafraîchies (ADEME 2005).

1.1.3 Réglementation thermique

La réglementation thermique RT2005 (Réglementation thermique, 2005) a succédé le 1er septembre 2006 à la réglementation thermique RT2000 (Réglementation thermique, 2000) dont l'application était obligatoire depuis le 1^{er} juin 2001. Elle s'applique à tous les bâtiments neufs. Cette révision à échéance de 5 ans de la réglementation énergétique des bâtiments neufs correspond à l'exigence de l'article 5 de la DPEB.

La réglementation thermique vise à réduire les consommations d'énergie dans les bâtiments, et à améliorer le confort thermique d'été dans les locaux non rafraîchis. Elle porte à la fois sur les bâtiments neufs résidentiels et tertiaires. Elle impose des exigences à satisfaire sur la consommation d'énergie, la température atteinte en été et les performances pour une série de composants (isolation, ventilation, système de chauffage ...). Huit zones

climatiques sont définies : H1a, H1b, H1c, H2a, H2b, H2c, H2d, H3 (voir Figure 1.3 et Tableau 1.3).

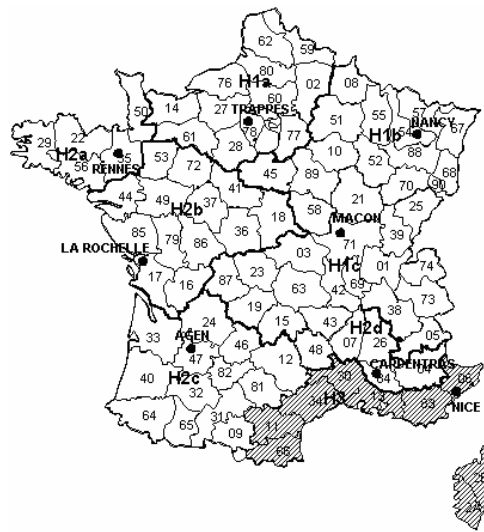


Figure 1.3 : Les zones climatiques définies par la réglementation thermique française

Nom de la zone climatique	Ville représentative	Latitude [°]
H1a	Trappes	48,77
H1b	Nancy	48,58
H1c	Mâcon	46,3
H2a	Rennes	48,07
H2b	La Rochelle	46,15
H2c	Agen	44,18
H2d	Carpentras	44,08
H3	Nice	43,65

Tableau 1.3 : Les huit zones climatiques de la réglementation thermique française

Le principe du calcul thermique dans la RT2005 consiste à comparer le bâtiment étudié à un bâtiment de référence, présentant la même géométrie. Les caractéristiques thermiques des composants d'enveloppe et des équipements du bâtiment de référence sont fixés à des valeurs de référence.

La RT2005 a trois exigences :

- **Les exigences sur la consommation d'énergie :** La consommation conventionnelle d'énergie d'un bâtiment pour le chauffage, la ventilation, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, les auxillaires des systèmes et l'éclairage des locaux (pour des bâtiments non résidentiels) s'exprime sous la forme d'un coefficient exprimé en kWh/m² d'énergie primaire (kWh_{ep}/m²), noté C_{ep} . La surface prise en compte est égale à la surface de plancher hors œuvre nette (SHON).

Le coefficient C_{ep} d'un bâtiment doit être inférieur ou égal au coefficient de référence de ce bâtiment, noté « C_{ep-ref} », déterminé sur la base des caractéristiques thermiques de référence.

- **Les exigences sur la température intérieure :** La température intérieure conventionnelle atteinte en été, notée T_{ic} , est la valeur maximale horaire en période d'occupation de la température opérative. Pour le résidentiel, la période d'occupation considérée est la journée entière. Elle est calculée en adoptant des données climatiques conventionnelles pour chaque zone climatique.

La température intérieure conventionnelle T_{ic} doit être inférieure à la température intérieure conventionnelle de référence, notée « T_{ic-ref} », déterminée sur la base des caractéristiques thermiques de référence.

- **Exigence de performances minimales pour une série de composants et équipements** : La RT2005 définit des exigences sur les performances des composants de l'enveloppe et des équipements de génie climatique.

1.1.4 Labels

Les labels haute performance énergétique : Ces labels ont été mis en place pour valoriser les bâtiments neufs obtenant un niveau de performance énergétique supérieur au niveau réglementaire. Ils sont attribués par des organismes en convention avec l'État (ADEME, 2007) :

- *Le label haute performance énergétique, HPE 2005* : Ce label exige une consommation conventionnelle d'énergie inférieure de 10 % à la consommation conventionnelle de référence de la RT2005.
- *Le label très haute performance énergétique, THP 2005* : Ce label exige une consommation conventionnelle d'énergie inférieure de 20 % à la consommation conventionnelle de référence de la RT2005.
- *Le label haute performance énergétique énergies renouvelables HPE EnR 2005* : Ce label correspond au label HPE et exige, de plus, le respect de l'une des conditions suivantes :
 - La part de la consommation conventionnelle de chauffage par un générateur utilisant la biomasse est supérieure à 50 %.
 - Le système de chauffage est relié à un réseau de chaleur alimenté à plus de 60 % par des énergies renouvelables.
- *Le label très haute performance énergétique énergies renouvelables et pompes à chaleur THPE EnR 2005* : Ce label correspond au label THPE et exige, de plus, le respect de l'une des conditions suivantes :
 - Le bâtiment est équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % des consommations de l'eau chaude sanitaire et la part de la consommation conventionnelle de chauffage par un générateur utilisant la biomasse est supérieure à 50 %.
 - Le bâtiment est équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % des consommations de l'eau chaude sanitaire et le système de chauffage est relié à un réseau de chaleur alimenté à plus de 60 % par des énergies renouvelables.
 - Le bâtiment est équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % de l'ensemble des consommations de l'eau chaude sanitaire et du chauffage.
 - Le bâtiment est équipé d'un système de production d'énergie électrique utilisant les énergies renouvelables assurant une production annuelle d'électricité de plus de 25 kWh/m² SHON en énergie primaire.
 - Le bâtiment est équipé d'une pompe à chaleur ayant un coefficient de performance annuel supérieur à 3,5.
 - Pour les immeubles collectifs et pour les bâtiments tertiaires à usage d'hébergement, le bâtiment est équipé de panneaux solaires assurant au moins 50 % des consommations de l'eau chaude sanitaire.
- *Les labels Effinergie et bâtiment basse consommation énergétique BBC 2005* : Il s'agit de labels gérés par l'association Effinergie dont le but est de promouvoir les

constructions à basse énergie et de développer en France un référentiel de performance énergétique des bâtiments neufs ou existants en regroupant les professionnels de la construction et les collectivités locales. Ces labels s'appuient sur le standard Suisse Minergie (Minergie, 2007), mais en l'adaptant aux particularités constructives, réglementaires, normatives et climatiques du marché français. Ces labels utilisent la méthode de calcul de la RT2005.

Les exigences de ce label dépendent du type de bâtiment :

- Pour les bâtiments à usage d'habitation, la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux est inférieure ou égale à une valeur en kWh/m²an d'énergie primaire qui s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{ep} = 50 \times (a + b) \quad (1.1)$$

La valeur du coefficient « a » est donnée dans le Tableau 1.4 en fonction des zones climatiques.

Zone climatiques	Coefficient a
H1-a, H1-b	1,3
H1-c	1,2
H2-a	1,1
H2-b	1,0
H2-c, H2-d	0,9
H3	0,8

Tableau 1.4 : Valeurs du coefficient a en fonction de la zone climatique

La valeur du coefficient « b » est donnée dans le Tableau 1.5 en fonction de l'altitude du terrain d'assiette de la construction.

Altitude	Coefficient b
≤ 400 m	0
> 400 m et ≤ 800 m	0,1
> 800 m	0,2

Tableau 1.5 : Valeurs du coefficient b en fonction de l'altitude

- Pour les bâtiments à usages autres que d'habitation, la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux est inférieure ou égale à 50 % de la consommation référence de la RT2005.

La Haute Qualité Environnementale (HQE) : La HQE prend en compte le développement durable d'un projet dans sa globalité. Elle est définie comme étant une démarche, celle de "management de projet" visant à limiter les impacts d'une opération de construction ou de réhabilitation sur l'environnement tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables (HQE, 2004).

La HQE définit 14 exigences (ou cibles) à respecter. Chaque cible se décompose en cibles élémentaires. On en distingue actuellement 52. La quatrième cible concerne la gestion de l'énergie qui se décompose en quatre cibles élémentaires :

- Renforcement de la réduction de la demande et des besoins énergétiques.
- Renforcement du recours aux énergies satisfaisantes de point de vue impact environnemental.

- Renforcement de l'efficacité des équipements énergétiques.
- Utilisation de générateurs propres lorsqu'on a recours à des générateurs à combustion.

1.2 Etat de l'art des opérations internationales

Suivant leurs niveaux de performances énergétiques, les bâtiments à basse consommation d'énergie peuvent être classés en trois familles (Chlela et al 2005) : **bâtiments performants**, **bâtiments très performants** et **bâtiments zéro énergie ou à énergie positive**.

Dans cette partie, nous présentons quelques opérations concernant ces trois familles, ainsi que des réalisations.

1.2.1 Bâtiments performants

Les bâtiments performants, souvent appelés bâtiments basse énergie, existent à plusieurs milliers d'exemplaires. Ils se caractérisent principalement par une conception architecturale bioclimatique, une bonne isolation thermique (15 à 20 cm d'isolant), des fenêtres performantes, un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait, parfois associé à un puits climatique, un système de génération performant (pompe à chaleur, chaudière bois, chaudière à condensation...) et une attention particulière est portée à la perméabilité à l'air et aux ponts thermiques. On a également recours à des sources d'énergies renouvelables pour la production d'énergie, comme le solaire, l'air, la géothermie ou le bois.

La réalisation de tels bâtiments en France, nécessite des évolutions mais pas de révolution. Les changements les plus importants portent sur les épaisseurs d'isolants (15 à 20 cm par comparaison aux 10 cm actuels en France) et l'utilisation d'une ventilation double flux avec échangeur. La mise en œuvre des opérations doit être soignée (Chlela et al 2005).

Les opérations les plus connues de ce type de bâtiments sont les labels Suisse MINERGIE® et MINERGIE-ECO®. MINERGIE® est un label d'efficacité énergétique et de confort. MINERGIE-ECO® est un complément au standard MINERGIE® qui prend en compte l'aspect écologique des constructions. Les bâtiments certifiés MINERGIE® et MINERGIE-ECO® existent par milliers en Suisse (MINERGIE, 2007).

1.2.1.1 Les labels MINERGIE® et MINERGIE-ECO®

MINERGIE® est un label de qualité en termes de performance énergétique et de confort thermique destiné aux bâtiments neufs et rénovés en Suisse (MINERGIE, 2007).

Exigences : Ce standard définit cinq exigences pour un bâtiment concernant l'enveloppe, le système de ventilation, les consommations annuelles d'énergie et le surcoût d'investissement qui ne doit pas dépasser 10% (voir Tableau 1.6 et Tableau 1.7).

Il existe éventuellement des exigences supplémentaires, en fonction de la catégorie du bâtiment, concernant l'éclairage et la production de froid.

Catégorie de bâtiments	Indice pondéré de dépense d'énergie (kWh/m ²)	Ventilation mécanique	Exigence primaire sur l'enveloppe
Habitat collectif	≤ 42	Obligatoire	$Q_h \leq 80\% \cdot Ch_{li}$
Habitat individuel	≤ 42	Obligatoire	$Q_h \leq 80\% \cdot Ch_{li}$
Administration	≤ 40	Obligatoire	$Q_h \leq 80\% \cdot Ch_{li}$
Ecoles	≤ 40	Obligatoire	$Q_h \leq 80\% \cdot Ch_{li}$
Commerce	≤ 40	Obligatoire	$Q_h \leq 80\% \cdot Ch_{li}$
Restauration	≤ 45	Obligatoire	$Q_h \leq 80\% \cdot Ch_{li}$

Tableau 1.6 : Les exigences du label MINERGIE® pour les bâtiments neufs

Catégorie de bâtiments	Indice pondéré de dépense d'énergie (kWh/m ²)	Ventilation mécanique	Exigence primaire sur l'enveloppe
Habitat collectif	≤ 80	Obligatoire	$Q_h \leq 120\% \cdot Ch_{ji}$
Habitat individuel	≤ 80	Obligatoire	$Q_h \leq 120\% \cdot Ch_{ji}$
Administration	≤ 70	Obligatoire	$Q_h \leq 120\% \cdot Ch_{ji}$
Ecoles	≤ 70	Obligatoire	$Q_h \leq 120\% \cdot Ch_{ji}$
Commerce	≤ 70	Obligatoire	$Q_h \leq 120\% \cdot Ch_{ji}$
Restauration	≤ 85	Obligatoire	$Q_h \leq 120\% \cdot Ch_{ji}$

Tableau 1.7 : Les exigences du label MINERGIE® pour les bâtiments rénovés

Q_h est le besoin de chauffage effectif du bâtiment. Ch_{ji} est le besoin de chauffage du bâtiment, calculé selon la norme Suisse (SIA 380/1, 2001). Q_h ne doit pas dépasser 80% de Ch_{ji} . On évite ainsi de compenser la qualité insuffisante d'une enveloppe de bâtiment uniquement par des installations techniques coûteuses.

L'indice pondéré de dépense d'énergie, E_{pond} , est la consommation annuelle d'énergie primaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation mécanique et le refroidissement. Cet indice est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{pond} = Q_h \cdot \frac{f}{\eta} + Q_{ww} \cdot \frac{f}{\eta} + ELK \cdot f \quad (1.2)$$

Avec :

Q_{ww} besoin d'eau chaude sanitaire (kWh/m²)
 ELK consommation d'électricité pour le refroidissement et la ventilation (kWh/m²)
 η rendement du système, producteur d'énergie (-)
 f facteur de conversion de l'énergie finale en énergie primaire (-)

Solutions standard : Des solutions standards sont proposées pour les maisons individuelles afin d'atteindre les exigences du label MINERGIE®. Ces solutions traitent de l'enveloppe (voir Tableau 1.8) et des systèmes.

	Elément de construction	
	En contact avec l'extérieur ou < 2 m sous le sol	En contact avec l'extérieur ou > 2 m sous le sol
Toiture, Plafond	0,20	0,25
Mur	0,20	0,28
Sol	0,20	0,28
Sol avec chauffage par le sol	0,20	0,25
Fenêtres	1,30	1,60
Portes	1,60	2,00

Tableau 1.8 : Les exigences du label MINERGIE® pour le coefficient U (W/m²K) des parois

Pour les ponts thermiques, des valeurs limites sont définies dans la norme SIA 380/1 (SIA 380/1, 2001). L'étanchéité à l'air de l'enveloppe doit être également soignée.

Le système de ventilation conseillé est la ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. L'efficacité du récupérateur de chaleur doit être supérieure à 80% et la consommation du ventilateur de l'ordre de 0,4 Wh/m³.

Pour la production de chaleur, cinq systèmes sont conseillés :

- Pompe à chaleur avec sonde géothermique
- Chauffage au bois + capteurs solaires
- Chauffage au bois automatique
- Récupération des rejets de chaleur
- Pompe à chaleur air / eau

MINERGIE-ECO® : Il s'agit d'un complément au standard MINERGIE®. En plus des exigences d'efficacité énergétique et de confort thermique, MINERGIE-ECO® exige des modes de construction sains et écologiques. L'évaluation des qualités d'un bâtiment dans les domaines de la santé et de l'écologie est effectuée à l'aide d'une méthode basée sur différentes normes (MINERGIE, 2007).

1.2.1.2 Exemples de réalisation

SD Worx : SD Worx est un immeuble de bureaux R+2 de 1200m² de surface (voir Figure 1.4), construit entre 2001 et 2002 dans la ville de Kortrijk en Belgique (Breesch et al, 2005).



Figure 1.4 : Vues de l'immeuble de bureaux SD Worx (Breesch et al, 2005)

L'isolation thermique du bâtiment a été soignée afin de réduire les déperditions par transmission (voir Tableau 1.9). Les déperditions par ventilation sont réduites en préchauffant l'air neuf à travers une installation de puits climatique (2 tubes de 40 m de longueur) couplée à un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. Le suivi du bâtiment entre 2002 et 2003, montre que la consommation d'énergie pour le chauffage est égale à 62 kWh/m²an.

Parois	Caractéristiques
Plancher haut	U = 0,28 (W/m ² K)
Plancher bas	U = 0,15 à 0,24 (W/m ² K)
Fenêtres	Ug = 1,1 à 0,6 (W/m ² K) g = 0,6 à 0,28

Tableau 1.9 : Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment SD Worx

Le confort thermique d'été est assuré via des solutions passives :

- Rafrâichissement de l'air neuf grâce à un puits climatique.
- Evacuation des apports internes et refroidissement de la structure à l'aide d'une surventilation nocturne.
- Les bureaux sont du côté nord du bâtiment et les zones de circulation sont du côté sud.
- Protections solaires extérieures pour les fenêtres de la façade sud.
- Gains internes dus aux équipements bureautiques et à l'installation d'éclairage artificiel réduits. La puissance d'éclairage installée est égale à 9,5 W/m².

Des économies d'énergie sont également réalisées à l'aide de capteurs de présence permettant la réduction des consommations d'électricité pour l'éclairage.

SolarBau : SolarBau est un programme de recherche Allemand visant à promouvoir les économies d'énergie et l'utilisation de l'énergie solaire dans les bâtiments tertiaires (SolarBau 2007). Dans le cadre de ce programme, un immeuble de bureaux appelé « DB-Netz AG » a été construit dans la ville de Hamm en Allemagne (voir Figure 1.5), ayant pour objectif d'avoir une consommation totale annuelle d'énergie primaire, pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation et l'éclairage, inférieure à 100 kWh/m² (Pfafferott et al, 2004).



Figure 1.5 : Vues de l'immeuble de bureaux DB-Netz AG (Pfafferott et al, 2004)

Le bâtiment possède une surface totale utile de 5974 m². Le renouvellement d'air est assuré grâce à un système de ventilation hybride (naturelle et mécanique). Les besoins de chauffage sont réduits en soignant l'isolation thermique et en récupérant les apports solaires. Le système de chauffage est une chaudière à gaz à condensation alimentant une installation de plancher chauffant. L'éclairage naturel est favorisé afin de réduire simultanément les consommations d'électricité et les apports internes en été. Le confort thermique d'été est assuré par le biais de solutions passives : une installation de puits climatique pour le rafraîchissement de l'air neuf, des protections solaires, et une surventilation naturelle nocturne permettent d'évacuer les apports internes et de refroidir la structure du bâtiment.

Le suivi du bâtiment entre 2001 et 2002 a révélé les performances suivantes :

- Le pourcentage de nombre d'heures de travail pour lesquelles la température opérative est supérieure à 25 °C est de 10%.
- La consommation totale annuelle d'énergie finale pour le chauffage et l'ECS est de 60,6 kWh/m²an. La consommation annuelle d'électricité pour les différents usages est de 62,1 kWh/m²an. Ceci correspond à une consommation annuelle totale d'énergie primaire de 129,1 kWh/m²an, pour un facteur de conversion de 2,8 pour l'électricité. L'objectif de 100 kWh/m²an n'a donc pas été atteint.

1.2.2 Bâtiments très performants

Il s'agit en général de bâtiments "passifs" dont le concept a été défini par le Dr. Wolfgang Feist de l'institut de recherche allemand Passivhaus (Passivhaus, 2007). Les constructions passives à une large échelle ont débuté en 1998 avec le projet européen CEPHEUS (CEPHEUS, 2001). Des bâtiments passifs ont ainsi été construits dans cinq pays Européens. Le retour d'expérience de ce projet a montré la faisabilité de ce type de bâtiment, ainsi que les précautions à prendre en compte lors de leurs mises en œuvre (Feist et al, 2005).

Un bâtiment passif est défini comme étant un bâtiment dans lequel l'ambiance intérieure est confortable tant en hiver qu'en été, sans devoir faire appel ni à un système conventionnel de chauffage ou de refroidissement.

Ces bâtiments sont en rupture profonde par rapport aux modes de construction conventionnels en France. Ils se caractérisent par une forte réduction des besoins de chauffage, conduisant souvent à supprimer le système de chauffage traditionnel. Le chauffage est alors assuré par le système de ventilation. Cet objectif peut être atteint grâce à une forte isolation thermique (30 à 40cm), une forte réduction de ponts thermiques et une très bonne étanchéité à l'air. De plus, les déperditions par ventilation sont réduites à travers un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. La ventilation double flux est parfois couplée à une installation de puits climatique afin de préchauffer l'air neuf et de protéger la centrale double flux des risques de givrage. Les apports gratuits fournis par le soleil, les occupants et les équipements sont pris en compte lors du dimensionnement du système de chauffage (Feist et al, 2005).

Pour assurer le confort thermique d'été, des solutions passives sont favorisées. L'air neuf est rafraîchi à l'aide d'un puits climatique et les apports solaires sont réduits à l'aide de protections solaires. De plus, le couplage surventilation nocturne - inertie thermique permet d'évacuer les apports internes accumulés durant la journée et de refroidir la structure et stocker ainsi de l'énergie afin d'éviter une surchauffe le lendemain.

La réduction des besoins énergétiques, tant pour le chauffage que pour le refroidissement, permet d'adopter des systèmes de production d'énergie spécifiques et efficace, combinant des sources d'énergie diversifiées, y compris des énergies renouvelables.

Suite au projet CEPHEUS, des labels de bâtiments passifs ont été créés en Allemagne et en Suisse. Le label Allemand s'appelle **Passivhaus** (Passivhaus, 2007) et le label Suisse **MINERGIE-P®** (MINERGIE, 2007). Le programme Passivhaus se décline en **Klimahaus** en Autriche, **CasaClima** en Italie et **Passiefhuis** en Belgique (CSTB, 2006). Cependant, les exigences de ces labels sont définies pour l'Europe centrale. Toute transposition dans un autre pays nécessite une étude préalable prenant en compte le contexte climatique et le mode de vie du pays, même si la méthodologie de conception et la physique des phénomènes restent les mêmes.

1.2.2.1 Le label MINERGIE-P®

MINERGIE-P® est un label de la marque MINERGIE® qui correspond au standard "bâtiment passif". Les exigences de ce standard en termes de consommations d'énergies sont évidemment plus basses que celles du standard MINERGIE®. Il est destiné aux catégories suivantes de bâtiments : habitat collectif, habitat individuel et administration. MINERGIE-P® pose des exigences concernant les cinq domaines suivants:

- Besoins spécifiques de puissance thermique :
La puissance maximale de chauffage doit être inférieure ou égale à 10 W/m².
- Besoins de chaleur pour le chauffage selon la norme SIA 380/1 (SIA 380/1, 2001) :
 $Q_h \leq 20 \%$ de la valeur limite Ch_{li}
- Indice pondéré de dépense d'énergie (voir équation (1.2)) :
Pour les bâtiments d'habitation, $E_{pond} \leq 30 \text{ kWh/m}^2$
Pour les bâtiments administratifs, $E_{pond} \leq 25 \text{ kWh/m}^2$
- Etanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment :
L'étanchéité à l'air du bâtiment pour une différence de pression de 50 Pa doit être inférieure ou égale à 0,6 vol/h.
- Les appareils électroménagers :
Dans les constructions MINERGIE-P®, les meilleures conditions permettant une faible consommation d'électricité doivent être réunies. Ceci exige d'une part des luminaires et des lampes à faible consommation énergétique et d'autre part l'utilisation exclusive d'appareils électroménagers de la classe d'efficacité A.
- Coût :
Les bâtiments MINERGIE®-P peuvent présenter un surcoût de 15 % au maximum par rapport aux objets conventionnels comparables.

La Figure 1.6 compare les exigences des deux standards : MINERGIE® et MINERGIE-P®.

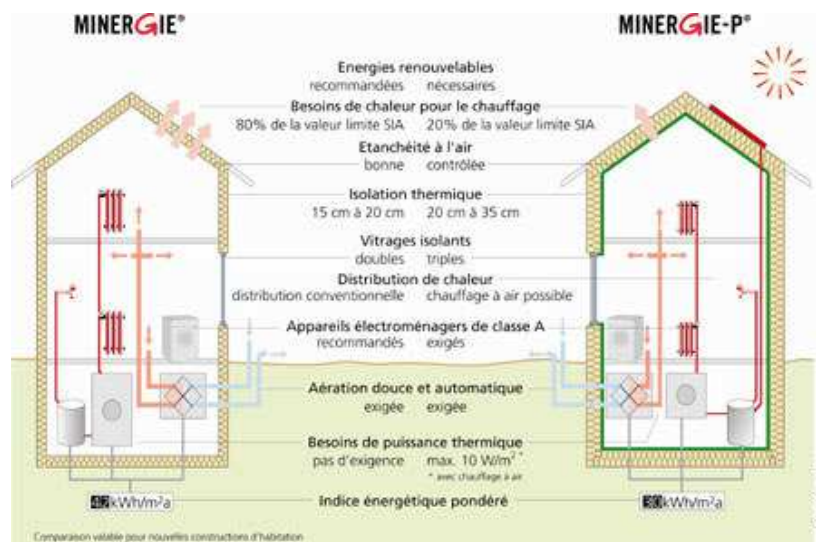


Figure 1.6 : Comparaison entre les labels MINERGIE® et MINERGIE-P®

Les bâtiments certifiés MINERGIE-P® peuvent éventuellement prétendre au label MINERGIE-ECO®.

1.2.2.2 Le label Passivhaus

Le Label Passivhaus est délivré par l'institut de recherche allemand Passivhaus, créée par le Dr. Wolfgang Feist en 1996 (Passivhaus 2007, Feist 2005). Ce label est destiné aux bâtiments résidentiels et tertiaires. Pour atteindre le standard Passivhaus, il est nécessaire d'avoir :

- Un besoin annuel de chauffage < 15 kWh/m².an.
- une demande annuelle d'énergie primaire inférieure à 120 kWh/m².an pour le chauffage, l'eau chaude et l'électricité (incluant les applications domestiques),

Un bâtiment Passivhaus est la combinaison d'une enveloppe avec une isolation thermique très performante, d'une perméabilité à l'air très faible, de la récupération d'énergie sur la ventilation et de préchauffage d'air neuf (double flux avec récupération, puits climatique) et des sources d'énergies renouvelables.

Le Tableau 1.10 indique les solutions techniques préconisées afin d'obtenir un bâtiment Passivhaus. Une exigence supplémentaire du label Passivhaus est que la puissance maximale de chauffage n'excède pas 10 W/m². En effet, lorsque cette condition est respectée, il est possible d'utiliser le système de ventilation pour le chauffage des locaux et d'éviter ainsi d'avoir recours à un système de chauffage traditionnel.

Orientation	Sud	Solaire passif
Parois opaques	$U \leq 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $\Psi \leq 0,01 \text{ W/(mK)}$	
Baies vitrées	$U \leq 0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $g \geq 0,5$ environ	
Perméabilité à l'air	Inférieure à 0,6 vol/h sous 50 Pa	
Préchauffage de l'air neuf	Puits climatique	Température de sortie $\geq 5^\circ\text{C}$
Ventilation	Double flux et échangeur	Efficacité > 80% Ventilation : < 0,4 Wh/m³
ECS	Capteurs solaires ou PAC	
Equipements	Equipements efficaces	

Tableau 1.10 : Solutions techniques préconisées pour un bâtiment PASSIVHAUS

L'analyse du coût global des bâtiments Passivhaus est difficilement quantifiable exactement et peut fortement différer d'un projet à l'autre. Les études réalisées à l'étranger montrent cependant que, par une approche d'intégration dès la conception, le coût total (coûts

additionnels à la construction et consommations sur une période de 30 ans) ne devrait pas excéder, en moyenne, celui d'une construction neuve. Ceci est principalement dû à la suppression des coûts liés aux systèmes conventionnels de chauffage devenus inutiles et aux niveaux des factures énergétiques pour une durée de 30 ans (Chlela et al, 2005).

1.2.2.3 Exemples de réalisations

ChristophorusHaus : ChristophorusHaus est un immeuble de bureaux de 1550m² de surface utile, situé en Autriche (voir Figure 1.7). Ce bâtiment a été construit en 2003 selon les exigences du standard Passivhaus. L'air est utilisé pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment. Il comprend les systèmes suivants (Blümel et al, 2005) :

- Un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. L'efficacité de l'échangeur est de 86%.
- Une installation de capteur solaire de 6 m² de surface et qui couvre 70% des besoins en ECS.
- Une pompe à chaleur réversible couplée à 8 capteurs enterrés verticaux de 100 m de longueur. La pompe à chaleur possède une puissance nominale pour le chauffage de 43 kW et un COP nominal de 4,03. Les capteurs enterrés ont été dimensionnés de façon à refroidir directement le bâtiment sans avoir recours à la pompe à chaleur. La puissance de refroidissement obtenue est de 25 W/m². La pompe à chaleur peut éventuellement fonctionner en mode froid.
- Une installation de capteurs photovoltaïques de 10 kWc de puissance. Cette installation sert à alimenter la pompe à chaleur et les auxiliaires du système de ventilation



Figure 1.7 : Vues de l'immeuble de bureaux ChristophorusHaus (Blümel et al, 2005)

Des simulations ont été effectuées afin d'évaluer les performances énergétiques du bâtiment. Les besoins de chauffage obtenus sont inférieurs à 15 kWh/m²an, le besoin de refroidissement est inférieur à 10 kWh/m²an et la consommation d'énergie primaire est inférieure à 80 kWh/m²an.

PassivSolarHaus de Cölbe : Il s'agit d'un immeuble de bureaux de 2180 m² de surface utile, situé à Cölbe en Allemagne (voir Figure 1.8). Construit en 1998, ce bâtiment est le premier Passivhaus tertiaire en Europe (Schweitzer, 2005). Le Tableau 1.11 indique les caractéristiques de l'enveloppe de ce bâtiment.

Parois	Caractéristiques
Plancher haut	U = 0,11 W/m ² K (jusqu'à 40cm d'isolation - laine minérale)
Plancher bas	U = 0,12 W/m ² K (jusqu' 24 cm d'isolation - mousse de verre)
Mur extérieur	U = 0,14 W/m ² K
Fenêtre	U = 0,75 W/m ² K (triple vitrage)

Tableau 1.11 : Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment PassivSolarHaus

L'air est utilisé pour le chauffage du bâtiment. Il comprend les systèmes suivants :

- Un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. L'efficacité de l'échangeur à air est égale à 80%.
- Une pompe à chaleur réversible couplée à 4 capteurs enterrés verticaux de 32 m de longueur.
- Une installation de capteurs solaires thermiques de 65 m².
- Une unité de cogénération : 12,5 kW thermique et 5,5 kW électrique.
- Un ballon de stockage d'eau chaude de 85 m³ à 95°C, isolé avec 50 cm de laine minérale. L'eau chaude stockée est utilisée pour le chauffage de l'air.
- Une installation de puits climatique pour le préchauffage de l'air en hiver et le rafraîchissement en été.
- Un système de surventilation naturelle nocturne pour le rafraîchissement passif du bâtiment.

Des protections solaires sont également mises en place afin de réduire les gains solaires en été.

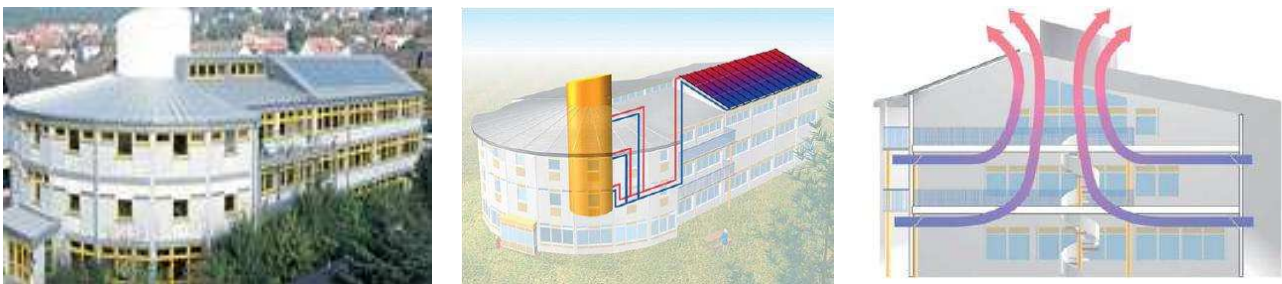


Figure 1.8 : Vues de l'immeuble de bureaux PassivSolarHaus (Schweitzer, 2005)

Energion : Energion est un immeuble de bureaux de 7000 m² de surface utile, situé à Ulm en Allemagne (voir Figure 1.9). Ce bâtiment a été construit en 2002 selon les exigences du label Passivhaus.



Figure 1.9 : Vues de l'immeuble de bureaux Energion (Faigle, 2005)

Le Tableau 1.12 indique les caractéristiques de l'enveloppe de ce bâtiment (Faigle, 2005). Le bâtiment comprend les systèmes suivants :

- Un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. L'efficacité de l'échangeur est égale à 80%
- Une installation de puits climatique pour le préchauffage et le rafraîchissement de l'air neuf.
- Une pompe à chaleur réversible couplée à 4 sondes géothermiques verticales de 100 m de profondeur, utilisée pour le chauffage en hiver et pour le refroidissement en été (120 kW de puissance de refroidissement). La pompe à chaleur alimente une installation de plancher chauffant et rafraîchissant.
- Une installation de capteurs photovoltaïques de 150 kWp de puissance électrique.
- Des protections solaires ont été mises en place afin de réduire les apports solaires en été et améliorer le confort visuel.

De plus, le bâtiment est relié à un réseau de chauffage urbain qui fournit une puissance maximale de chauffage de 185 kW.

Parois	Caractéristiques
Plancher haut	$U = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$
Plancher bas	$U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ (30 cm d'isolation)
Mur extérieur	$U = 0,11 - 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ (30cm d'isolation)
Fenêtre	Double et triple vitrage

Tableau 1.12 : Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment Energon

1.2.3 Bâtiments zéro énergie ou à énergie positive

Un bâtiment zéro énergie ou à énergie positive est défini comme étant un bâtiment qui produit autant ou plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ces bâtiments sont la combinaison de bâtiments basse énergie ou passifs avec des toits solaires photovoltaïques et parfois thermiques. Leur réalisation en France n'est possible aujourd'hui que via des subventions permettant de limiter le surcoût lié aux systèmes photovoltaïques. Leur développement à large échelle nécessite des évolutions fortes en ce qui concerne le coût des systèmes photovoltaïques (Chlela et al, 2005).

De nombreux programmes d'opérations concernant les bâtiments zéro énergie ou à énergie positive sont en cours à l'étranger, comme au Japon, Etats-Unis, Canada, Allemagne et Nouvelle-Zélande. A l'exception du Japon, ces opérations sont basées sur le même concept de bâtiment. Les besoins d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'électricité sont réduits à travers une bonne conception de l'enveloppe et des équipements performants et économes. Le complément des besoins d'énergie est comblé par des sources d'énergie renouvelables comme le solaire photovoltaïque et thermique. Au Japon, Une isolation thermique vraiment efficace, garantissant aux habitants le confort le plus élevé et la meilleure rentabilité, est plutôt l'exception que la règle. Il n'y a pas non plus de valeurs limites à respecter. Les maisons vendues au Japon comme «zéro énergie» sont des maisons avec une isolation conventionnelle utilisant les technologies solaires photovoltaïques et thermiques pour produire autant voire plus d'énergie que leurs besoins annuels (CSTB, 2006).

1.2.3.1 Exemples de réalisation

Maison à énergie positive de Fellbach : Il s'agit d'une maison individuelle située dans la ville de Fellbach en Allemagne (Chlela et al, 2005). Le principe de cette maison est de réduire les besoins de chauffage en travaillant l'enveloppe, soit à environ 11 kWh/m²an, et d'assurer ces besoins à l'aide d'une pompe à chaleur réversible alimentée en électricité photovoltaïque. La maison est compacte avec la présence d'une véranda au sud, et une façade nord aveugle. Les caractéristiques de l'enveloppe vérifient les exigences du label Passivhaus (voir Tableau 1.13)

Parois	Caractéristiques
Parois opaques	$U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
Fenêtres	vitrages triples avec argon, $U = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, facteur solaire d'environ 0,5
Etanchéité à l'air	0,5 Vol/h sous 50 Pa
Ponts thermiques	Pas de ponts thermiques

Tableau 1.13 : Caractéristiques de l'enveloppe de la maison à énergie positive de Fellbach

Le bâtiment comprend les systèmes suivants :

- Un système double flux avec échangeur haute efficacité sur l'air extrait.
- Une installation de puits climatique qui sert au préchauffage de l'air neuf en hiver et au rafraîchissement en été.
- Un toit photovoltaïque assurant une puissance de pointe de 8 kWp et produisant environ 7500 kWh/an.

La production d'énergie électrique photovoltaïque est supérieure aux besoins des équipements et permet d'alimenter tous les usages. La consommation électrique pour le chauffage (pompe à chaleur et pompes de circulation) s'élève à 1500 kWh, celle de la production d'ECS à 700 kWh et celle de la ventilation à 600 kWh.



Figure 1.10 : Vues de la maison à énergie positive de Fellbach (Chlela et al, 2005)

Plusenergiehaus® de Freiburg : Il s'agit de maisons solaires bioclimatiques dont la principale caractéristique est de produire plus d'énergie que nécessaire aux occupants. Les bâtiments sont conçus comme un système préfabriqué modulaire avec ossature métallique ou bois (Chlela et al, 2005).

Le concept est une amélioration de la maison passive avec de larges baies vitrées au sud qui constituent la principale source de chaleur et assurent l'éclairage des pièces principales, ainsi qu'une toiture photovoltaïque. Les balcons sont en acier galvanisé et partiellement solidaires de la structure pour limiter les ponts thermiques. Le coefficient de transmission des parois opaques est de $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ et les baies vitrées sont constituées d'un triple vitrage. Les besoins annuels de chauffage varient entre 10 et 15 kWh/m^2 .



Figure 1.11 : Vues des maisons à énergie positive de Freiburg (Chlela et al, 2005)

Les déperditions par ventilation sont réduites via un système de ventilation avec récupération de chaleur sur l'air extrait. Une toiture photovoltaïque produit entre 3 et 12 kWp suivant la taille du bâtiment. Le débord de cette toiture joue également le rôle de brise soleil.

1.3 Etat de l'art des technologies

L'analyse bibliographique des bâtiments à basse consommation d'énergie montre que celles-ci sont basées sur les mêmes critères, à savoir, réduire les besoins énergétiques, et produire le complément d'énergie de façon efficace tout en utilisant des sources d'énergies renouvelables. On a donc une approche portant sur :

- La réduction des besoins de chauffage à travers une isolation performante, la réduction des ponts thermiques, l'amélioration de l'étanchéité à l'air et le remplacement d'une ventilation non maîtrisée par un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait, parfois couplé à un puits climatique ;

- Le traitement du confort d'été est effectué par des solutions passives, associées dans certains cas à des systèmes de climatisation performants. Comme solutions passives on peut citer : protections solaires, puits climatique pour le rafraîchissement de l'air neuf, couplage inertie thermique et surventilation nocturne ;
- La réduction des consommations d'électricité via des usages performants ;
- Le recours à une conception architecturale bioclimatique et à des sources d'énergies renouvelables pour la production d'énergie, comme le solaire, l'air, l'eau, la géothermie et le bois ;
- L'utilisation de générateurs d'énergie à haute efficacité et la réduction des pertes de distribution.

Dans cette partie nous présentons les principales technologies utilisées dans les bâtiments à faibles consommations d'énergie. Ces techniques concernent l'enveloppe, la ventilation, les systèmes de production d'énergie, les sources d'énergie renouvelables et les usages.

1.3.1 Enveloppe

L'analyse des études sur l'utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment montre la tendance à réduire les besoins en chaud et en froid à travers une optimisation de l'enveloppe.

Parois opaques : Les deux caractéristiques primordiales agissant sur les besoins de chauffage sont l'isolation thermique (ponts thermiques inclus) et l'étanchéité à l'air. En utilisant les matériaux isolants disponibles, la voie la plus directe pour renforcer l'isolation thermique est l'augmentation de l'épaisseur. C'est la solution préconisée dans les labels Passivhaus, MINERGIE® et MINERGIE-P®.

Pour traiter les ponts thermiques, trois procédés se dégagent : l'isolation thermique par l'extérieur, l'utilisation de rupteurs de ponts thermiques et les structures à ossature bois, surtout utilisées pour les maisons individuelles.

Le point critique reste la rénovation dans les cas où l'isolation par l'extérieur n'est pas possible. Pour répondre à ce défi, un effort important est fait par exemple en Suisse et en Allemagne pour développer des isolants "sous-vide" à très haute performance et de faible épaisseur (Chlela et al, 2005). Ces isolants utilisent les principes de basse pression et de confinement pour réduire le nombre et la mobilité des molécules de gaz. Les conductivités thermiques obtenues sont de l'ordre de 5.10^{-3} W/mK.

Etanchéité à l'air : un effort tout particulier est porté sur l'étanchéité à l'air, afin d'éviter les pertes de chaleur dues aux infiltrations d'air. Pour les labels les plus exigeants, comme Passivhaus et MINERGIE-P®, une valeur maximale de 0,6 vol/h sous 50 Pa est imposée.

Parois transparentes : Afin de réduire les besoins de chauffage, les performances thermiques des parois transparentes doivent être améliorées. Les innovations technologiques récentes ont permis de faire des progrès.

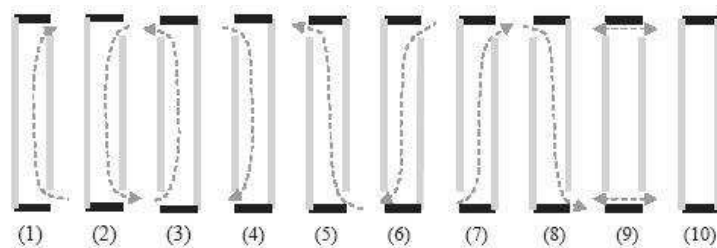
Le Tableau 1.14 donne des valeurs du coefficient de transmission U_g de divers type de vitrages. Ces performances restent malgré tout, encore loin de celles atteintes pour les parois opaques.

Nature du vitrage	U_g (W/m ² K)
Simple vitrage clair	5,90
Double Vitrage – verre clair (remplissage en air)	2,70
Triple Vitrage – verre clair (remplissage en air)	1,75
Double Vitrage – couche basse émissivité (remplissage en argon)	1,45
Triple Vitrage - une couche basse émissivité (remplissage en argon)	1,00
Triple Vitrage – deux couches basse émissivité (remplissage en argon)	0,71
Triple Vitrage – deux couches basse émissivité (remplissage en krypton)	0,63
Rappel : $U_{\text{parois-opaques}}$ dans les Passivhaus	0,15

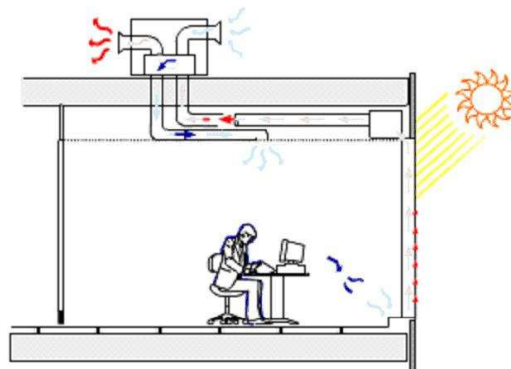
Tableau 1.14 : Exemple de coefficients U_g des vitrages (WINDOW5, 2005)

Façade double peau : une façade double peau est constituée de deux vitres séparées par une cavité d'air. En général, la vitre intérieure est un double vitrage, et la vitre extérieure est un simple vitrage. La convection dans la cavité d'air peut être soit naturelle (tirage thermique), soit forcée (ventilation mécanique), soit hybride (naturelle + forcée). L'épaisseur de la cavité d'air est choisie en fonction de nombreux paramètres, à savoir, le type de ventilation, les conditions climatiques et les performances thermiques visées. La cavité contient aussi une protection solaire et doit être accessible pour des raisons de maintenance et de nettoyage.

L'utilisation d'une façade double peau est réservée aux bâtiments tertiaires totalement vitrés. Ses principaux avantages sont l'isolation acoustique et thermique. Elle peut être utilisée avec différents scénarii de ventilation comme le montre la Figure 1.12 (Parka et al, 2004). La première configuration est la plus courante.

**Figure 1.12 : Les différents scénarii de ventilation d'une façade double peau (Parka et al, 2004)**

Avec la ventilation, une autre exploitation de la façade double peau est possible. Il s'agit de l'utiliser pour la récupération de chaleur comme le montre la Figure 1.13. Le principe est de combiner la façade double peau avec les systèmes de climatisation et de ventilation.

**Figure 1.13 : Ventilation et récupération d'énergie pour une façade double peau (Permasteelisa, 2007)**

En hiver, la lame d'air est utilisée en récupération de chaleur. En été, la ventilation et la protection solaire, permettent de limiter la température intérieure. Par extension, une façade double peau au Nord pourrait être exploitée pour le rafraîchissement.

Pour fonctionner d'une manière optimale, de tels systèmes complexes exigent une gestion combinée « automatismes-utilisateurs » performante.

Protection solaire : Afin de réduire les apports solaires en période estivale, une protection solaire (store, brise-soleil ...) doit être associée à toutes les fenêtres. Ceci permet d'une part de réduire les apports solaires et ainsi la puissance nécessaire au refroidissement, et d'autre part d'assurer un bon confort visuel en évitant l'éblouissement.

Inertie thermique : La plupart des bâtiments modernes présentent souvent des structures légères avec une faible inertie thermique et des enveloppes parfois sur-vitrées qui engendrent des apports solaires trop importants. En période estivale, ces apports solaires associés aux gains internes peuvent provoquer une surchauffe dans le bâtiment et donc un inconfort.

L'augmentation de l'inertie thermique est un moyen traditionnel, efficace et passif, qui permet d'améliorer le confort thermique d'été. De plus, avec le regain d'intérêt pour le solaire passif, l'inertie thermique des bâtiments revient au premier plan. En effet, alors que l'inertie thermique "consomme" de l'énergie quand celle-ci est payante (on chauffe les murs !), au contraire, quand l'énergie est gratuite, l'inertie thermique peut jouer un rôle essentiel pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

A côté des solutions traditionnelles de murs "lourds" (béton, pisé, brique...), de nouvelles technologies sont redécouvertes et adaptées, comme l'utilisation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe. Les matériaux à changement de phase (MCP) permettent de substituer au stockage par chaleur sensible, un stockage par chaleur latente qui nécessite un volume et une masse bien moindres pour la même quantité d'énergie thermique stockée ou déstockée. Les MCP sont utilisés dans le bâtiment, soit pour le chauffage, soit pour le rafraîchissement :

- **Rafraîchissement :** en période de forte chaleur, lorsque la température intérieure dépasse leur point de fusion, les MCP absorbent de l'énergie en fondant. Ce stockage d'énergie par changement de phase permet de limiter l'augmentation de la température intérieure en vue de maintenir un certain niveau de confort. Cette énergie est restituée au local ultérieurement lorsque la température intérieure diminue en dessous du point de solidification. Une surventilation nocturne est souvent mise en place pour accélérer le processus de solidification.
- **Chauffage :** en période hivernale, les MCP peuvent être utilisées pour le chauffage en stockant de l'énergie solaire pendant la journée et en la restituant au bâtiment la nuit.

1.3.2 Ventilation

Avec la réduction drastique des pertes de chaleur dans les bâtiments à basse consommation d'énergie, par le renforcement de l'isolation et de l'étanchéité, la ventilation devient une exigence absolue pour assurer la qualité de l'air dans les logements. Cependant, la ventilation mécanique contrôlée dans son principe initial, à savoir l'aspiration d'air extérieur froid à travers des entrées d'air et le rejet de l'air intérieur chaud contribue pour une part importante aux déperditions thermiques.

Afin de traiter cet antagonisme, renouvellement d'air sans perte d'énergie, de nouveaux systèmes de ventilation ont été développés dans les pays les plus avancés dans le domaine des bâtiments à faible consommation. Le système de ventilation simple flux par extraction a donc été remplacé par un système double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait.

Le double flux est souvent couplé à un puits climatique qui puise l'énergie du sol pour préchauffer l'air neuf en hiver et le rafraîchir en été.

La ventilation est éventuellement utilisée comme solution passive pour le rafraîchissement du bâtiment, de manière naturelle, mécanique ou hybride. Ce mode de rafraîchissement est souvent appelé le "free cooling".

1.3.2.1 Ventilation double flux avec récupération de chaleur

Le système de ventilation double flux avec récupération de chaleur est un système de ventilation mécanique, utilisant un échangeur de chaleur pour préchauffer l'air neuf extérieur en récupérant une partie de la chaleur de l'air extrait, permettant ainsi de réaliser des économies d'énergie. L'utilisation d'un système double flux dans un bâtiment à basse consommation d'énergie est quasi systématique.

La Figure 1.14 montre un exemple d'une installation de ventilation double flux avec récupération pour un bâtiment tertiaire.

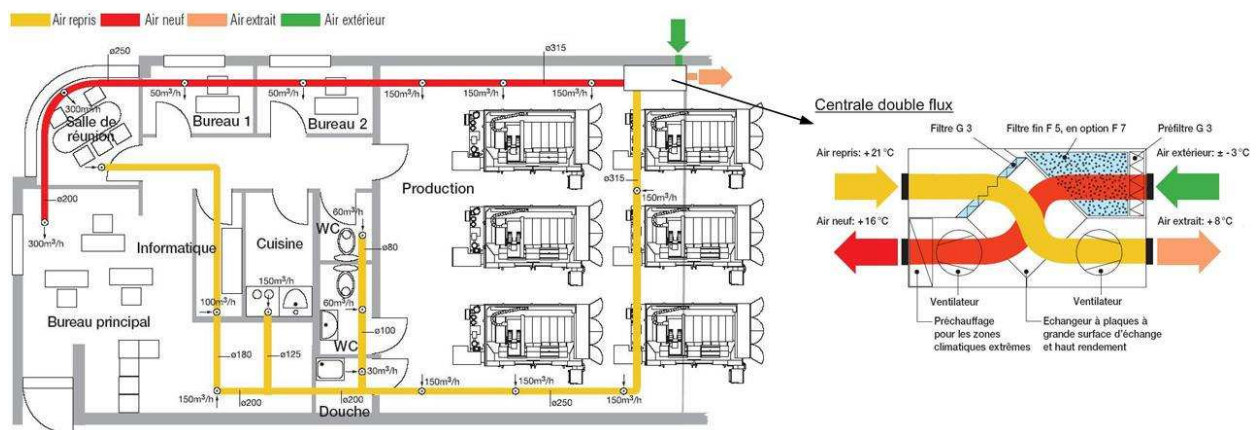


Figure 1.14 : Exemple d'une installation de ventilation double flux avec récupération pour un bâtiment tertiaire (Helios, 2007)

L'échangeur : Il existe deux grandes familles d'échangeurs pour ce type de système : échangeur statique et échangeur rotatif. Les échangeurs statiques sont les plus couramment utilisés. Ils peuvent être à contre-courants, à courants croisés ou à contre-courants croisés (voir Figure 1.15). L'efficacité de ces échangeurs varie avec le type : courants croisés (50 à 70%), contre-courants croisés (70 à 80%), contre-courants (supérieure à 85%). Les échangeurs rotatifs, constitués de plaques d'aluminium ondulées enroulées autour de l'axe de rotation ont une efficacité de récupération de chaleur de l'ordre de 70% à 80% (CSTB, 2006).

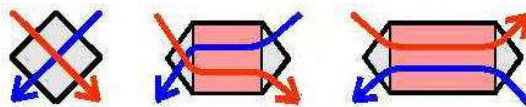


Figure 1.15 : Trois types d'échangeurs statiques (de gauche à droite : courants croisés, contre-courants croisés, contre-courants)

La régulation : La plupart des systèmes de ventilation ont 3 ou 4 allures de fonctionnement : réduit pour les périodes d'inoccupation des locaux, normal, élevé pour les périodes de sur-occupation ou de besoin d'évacuation d'une pollution spécifique (cuisine par exemple), et parfois une allure pour l'été avec by-pass de l'échangeur. Les moteurs à courant continu permettent une variation électronique de la vitesse pour s'adapter aux plages de fonctionnement, et au réseau installé. La commande peut se faire par l'intermédiaire d'un interrupteur manœuvré par l'utilisateur, ou d'un tableau de commande. Un certain nombre de produits permettent également de programmer différents types de fonctionnement avec une horloge (CSTB, 2006).

Le dégivrage : La plupart des échangeurs comportent un dégivrage électrique pour éviter l'apparition de givre sous certaines conditions (air extrait humide échangeant avec de l'air neuf très froid). Il est la plupart du temps possible de coupler l'arrivée d'air neuf à des conduits enterrés (puits climatique), ce qui permet d'assurer une température minimum d'air en entrée de l'échangeur en hiver, évitant ainsi un système de dégivrage.

Beaucoup de produits peuvent également intégrer en option le passage de l'air soufflé sur des batteries électriques ou à eau chaude, après l'échangeur, pour assurer des températures plus élevées et contribuer au chauffage.

Le by-pass en été : En été, et parfois en demi-saison, il n'est pas toujours nécessaire de récupérer l'énergie de l'air extrait pour l'air soufflé, par exemple lorsqu'on souhaite profiter d'une faible température extérieure pour rafraîchir le local sans chauffer l'air neuf par l'air extrait. Certaines centrales sont donc équipées d'un by-pass. Suivant les modèles, le by-pass est une cassette à installer dans le système de ventilation par l'utilisateur à l'arrivée des beaux jours, ou est déjà intégré dans le système. Dans ce cas, il peut être actionné par un interrupteur, ou pour les modèles les plus perfectionnés, être actionné de façon automatique en fonction de la température extérieure.

Performance énergétique : Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer l'impact d'une ventilation double flux sur les performances énergétiques d'une maison individuelle standard, et ceci pour le climat français. Comparée à une ventilation simple flux, la ventilation double flux avec un échangeur de chaleur à 75% d'efficacité, réduit les consommations d'énergie finale de 22% pour le climat de Nancy, 19% pour La Rochelle et 16% pour Nice (Chlela et al, 2006a).

1.3.2.2 Puits climatique

Un puits climatique consiste en un ensemble de tubes (ou éventuellement d'un tube unique), enterrés dans le sol à l'horizontale et intégrés au système de ventilation mécanique. Le principe consiste à utiliser l'inertie du sol qui amortie et déphase les fluctuations de la température de surface exposée aux conditions climatiques. Ces deux phénomènes s'accroissent avec la profondeur. Ainsi, à partir d'une certaine profondeur, la température du sol est supérieure à la température de l'air extérieur en hiver et inférieure à celle-ci en été. Le puits climatique permet ainsi de préchauffer l'air en hiver et de le rafraîchir en été. La Figure 1.16 illustre le schéma de principe d'une installation de puits climatique.

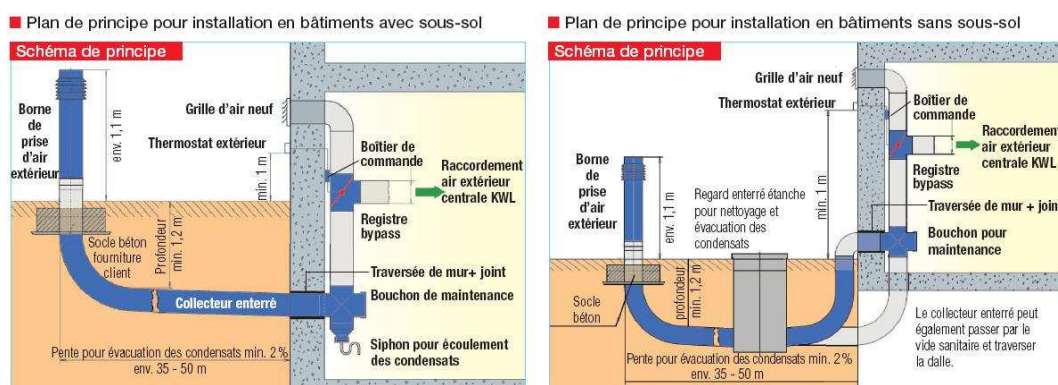


Figure 1.16 : Schéma de principe d'une installation de puits climatique pour une maison individuelle (Helios, 2007)

Régulation : La régulation permet d'envisager un fonctionnement du puits climatique sur l'année. Le ventilateur du puits climatique fonctionne avec un thermostat placé à l'extérieur du bâtiment et fera varier à l'aide d'un by-pass l'air du puits et l'air extérieur en fonction de la pertinence du passage par le puits. En général, le passage à travers le puits climatique n'est pas intéressant de point de vue énergétique pour une température extérieure comprise entre 8 et 20°C (Chlela et al, 2006b).

Performance énergétique : Le potentiel de chauffage et de rafraîchissement d'un puits climatique a été largement traité de manière expérimentale et numérique.

Dorer et al (1998) ont suivi une installation de ventilation mécanique regroupant un puits climatique couplé à une centrale double flux et installée dans un bâtiment résidentiel en Suisse. Le suivi a révélé une contribution marginale du puits climatique au gain énergétique en période hivernale. Le seul intérêt du puits climatique était la protection contre le givrage. Hollmuller et al (2001) ont montré, via des calculs et un suivi de terrain, que pour le climat Suisse, une centrale double flux est bien plus efficace qu'un puits climatique pour le préchauffage de l'air neuf. Cependant, le puits climatique présente un grand potentiel pour le rafraîchissement en été. Al-Amji et al (2006), Ghosal et al (2004), Bojic et al (1997) et Gauthier et al (1997) ont tous montré l'intérêt du puits climatique pour le préchauffage et le rafraîchissement des bâtiments.

De plus, le potentiel du puits climatique pour le chauffage et le rafraîchissement d'une maison individuelle a été analysé numériquement en prenant en compte trois villes française : Nancy, La Rochelle et Nice (Chlela et al, 2006b). Comparé à une centrale double flux, le puits climatique a une contribution marginale aux gains énergétiques en hiver. Cependant, il présente un grand potentiel pour le rafraîchissement de la maison en été.

1.3.2.3 Le free cooling

Le "free cooling" consiste à refroidir un bâtiment par ventilation mécanique ou naturelle, en utilisant l'énergie gratuite de l'air extérieur lorsque celui-ci présente une température inférieure à la température intérieure.

Free cooling diurne : Le free cooling du jour consiste à surventiler les locaux avec de l'air extérieur plus frais que l'air intérieur. La limite de confort thermique étant de 26°C dans les bureaux (NF EN ISO 7730, 2006), il existe donc un pouvoir rafraîchissant naturel non négligeable de l'air extérieur lorsque sa température est inférieure à 26°C, et ceci sans traitement et donc sans coût énergétique autre que son transport.

Free cooling nocturne : Le free cooling nocturne ou « surventilation nocturne », consiste à rafraîchir le bâtiment la nuit grâce à de l'air extérieur. On parle de "décharge nocturne" du bâtiment puisqu'il évacue toute la chaleur excédentaire accumulée pendant la journée. Ceci permet en plus de refroidir la structure du bâtiment (planchers, murs) et d'éviter ainsi une surchauffe durant la journée. Pour que ce phénomène soit possible, il faut d'une part, favoriser l'utilisation de matériaux de construction lourds pour assurer l'accumulation ; et d'autre part, garantir le contact entre ceux-ci et l'air frais de ventilation pour évacuer la chaleur accumulée. A défaut de quoi, on ne refroidirait que l'air ambiant du bâtiment, qui se réchaufferait au premier rayon de soleil. Concrètement (Energie+, 2006), les faux plafonds et/ou faux planchers sont à éviter, car ils isolent la masse thermique de l'air intérieur. Les cloisons intérieures en maçonnerie lourde sont à privilégier par rapport aux cloisons légères et un revêtement de sol de type carrelage est préférable à une moquette.

Le "free cooling", de jour comme de nuit, nécessite des débits de ventilation relativement importants. L'installation de ventilation doit donc être dimensionnée pour assurer ces débits (conduits, ventilateurs, bouches,). Si le bâtiment est déjà équipé d'un système de climatisation tout air ou si les débits de ventilation hygiénique sont importants (du fait de l'occupation, dans des salles de conférence, auditorium,...), cet aspect ne représente peut-être pas un surcoût conséquent. Par contre, lorsque la ventilation hygiénique est limitée, la possibilité d'effectuer du free cooling mécanique entraîne un surdimensionnement, donc un surcoût important de l'installation. Des éléments particuliers doivent être prévus pour amener l'air dans le bâtiment sans risque d'effraction (grilles, fenêtres automatisées,...), éventuellement pour lui permettre de circuler (grilles de transfert, portes coupe-feu,...) et pour l'extraire (grilles d'extraction, cheminées,...).

1.3.3 Systèmes et énergies renouvelables

La production d'énergie dans les bâtiments à basse consommation d'énergie est réalisée grâce à des systèmes efficaces utilisant des sources d'énergie diversifiées. Il peut s'agir du chauffage et de la production de l'eau chaude sanitaire par le biais de panneaux solaires, du chauffage au bois, du chauffage grâce à une chaudière à condensation, l'exploitation de la l'énergie ambiante (l'eau, l'air, le sol, ...) par une pompe à chaleur et de la production de l'électricité à partir de capteurs solaires photovoltaïques ou d'éoliennes. De plus, on peut avoir recours à la cogénération qui consiste à produire simultanément de l'électricité et de la chaleur tout en réduisant la consommation d'énergie primaire.

1.3.3.1 Chaudière à condensation

La technique des chaudières à condensation consiste à récupérer la chaleur de vaporisation des fumées en les refroidissant au contact des parois froides d'un échangeur.

La combustion du méthane qui compose 80 % du gaz naturel produit du gaz carbonique et de l'eau sous forme de vapeur. La quantité de chaleur alors dégagée par la combustion s'appelle le pouvoir calorifique inférieur (PCI) car l'eau produite reste sous forme de vapeur et est évacuée dans l'atmosphère avec les produits de combustion. Si on condense cette vapeur d'eau dans un échangeur de chaleur, on récupère l'énergie latente qui y est contenue. La chaleur totale ainsi produite est alors appelée le pouvoir calorifique supérieur (PCS) soit $PCS = PCI + \text{chaleur de vaporisation de l'eau}$.

La technique de la condensation est principalement utilisée dans les chaudières à gaz. Il existe également des chaudières fuel à condensation, mais leur utilisation est actuellement rare, pour trois raisons :

- La température à partir de laquelle les fumées issues de la combustion du fuel se condensent (point de rosée) est plus basse d'une dizaine de degrés que dans le cas du gaz. Les périodes pendant laquelle la condensation est effective sont donc plus réduites.
- La teneur en vapeur d'eau des fumées issues du fuel est plus faible que pour le gaz. La quantité de chaleur récupérable est donc plus faible, ce qui limite la rentabilité du surcoût de la technologie "condensation".
- Le fuel contient du soufre et génère des condensas plus acides et donc corrosifs pour la cheminée et l'échangeur. Il faut en outre traiter les condensas avant leur rejet.

Le gain énergétique réalisé grâce à une chaudière à condensation se situe à deux niveaux :

- Condensation de la vapeur d'eau des fumées. Pour une chaudière au gaz, on peut atteindre un gain maximum de 11 % du PCI. On parle alors de gain en chaleur latente.
- Diminution de la température des fumées de 150 °C à 45°C grâce à l'augmentation de la surface d'échange. On parle alors de gain en chaleur sensible.

Durant la saison de chauffe, dans une installation où les corps de chauffe ont été dimensionnés pour un régime départ/retour de 90°C/70°C, le rendement utile sur PCI d'une chaudière à condensation varie de 95% à 110% avec condensation. On peut comparer ce chiffre aux meilleurs rendements utiles des chaudières traditionnelles haut rendement qui sont de l'ordre de 92% à 94 % (Energie+,2006).

En France, les chaudières à condensation bénéficient d'un taux de crédit d'impôt de 25%. Dans certaines conditions, ce taux peut être porté à 40% (ADEME, 2007).

1.3.3.2 Pompe à chaleur

La pompe à chaleur (PAC) est une technologie qui permet de puiser de l'énergie dans le milieu ambiant (l'eau, l'air, le sol, ...), pour la restituer au bâtiment pour le chauffage et/ou le refroidissement. L'efficacité d'une pompe à chaleur est donnée par son coefficient de performance (COP pour le mode chaud et EER pour le mode froid), qui traduit le rapport entre la quantité d'énergie utilisée pour la faire fonctionner et la quantité d'énergie qu'elle délivre. Les principaux types de PAC sont :

Pompe à chaleur prélevant de l'énergie sur l'air extérieur : Il s'agit des pompes à chaleur sur l'air extérieur absorbant l'énergie présente naturellement dans l'air. Cette énergie est utilisée pour les besoins de chauffage ou de rafraîchissement. Le coefficient de performance nominal de ce type de machine est de l'ordre de 3.

En période hivernale et pour des températures extérieures très basses, l'évaporateur situé en contact avec l'air extérieur peut givrer, ce qui diminue l'efficacité de la PAC. C'est pourquoi elles sont souvent assorties d'une régulation qui inverse périodiquement et pour un court moment leur fonctionnement afin d'assurer le dégivrage de l'évaporateur. Dans les régions à climat rigoureux, il est nécessaire de prévoir un chauffage d'appoint qui prenne le relais de la PAC lorsque la température extérieure devient trop basse.

Pompe à chaleur prélevant de l'énergie dans le sol : Parmi tous les types de pompes à chaleur existantes, les pompes à chaleur géothermiques sont les plus performantes. Le principe consiste à puiser de l'énergie dans le sol, grâce à un réseau de tubes enterrés dans lesquels circule de l'eau glycolée. Selon les performances annoncées par les industriels, le coefficient de performance nominal de ce type de pompe à chaleur, peut atteindre 5.

Les capteurs enterrés peuvent être placés en configuration horizontale ou verticale :

- Les capteurs horizontaux sont des tubes de polyéthylène ou de cuivre gainés de polyéthylène. Ils sont installés en boucles enterrées horizontalement à faible profondeur, à savoir de 0,50 m à 2,0 m. Dans ces boucles circule en circuit fermé de l'eau additionnée d'antigel ou le fluide frigorigène de la pompe à chaleur selon la technologie employée.

La longueur totale des tubes d'un capteur horizontal dépasse généralement plusieurs centaines de mètres. Ils sont repliés en boucles distantes d'au moins 40 cm. On estime la surface de capteur nécessaire de 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer.

- Les capteurs verticaux, appelés aussi sondes géothermiques verticales, sont constitués de deux tubes de polyéthylène formant un U installés dans un forage pouvant aller jusqu'à 100 m de profondeur et scellés dans celui-ci par du mortier. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau additionnée de liquide antigel.

Les sondes géothermiques sont plus délicates à poser. Il est nécessaire de faire appel à une entreprise de forage qualifiée et de respecter les procédures administratives concernant la protection des sous-sols. On estime que 2 sondes géothermiques de 50 m de profondeur conviennent pour chauffer une maison de 120 m² habitables. L'emprise au sol est minime par rapport à des capteurs horizontaux (ADEME, 2007).

Actuellement, en France, ce sont les configurations avec capteurs horizontaux qui sont les plus répandues. Ces systèmes sont les moins coûteux mais nécessitent de disposer d'une surface de terrain suffisante. Ils sont donc surtout réservés au chauffage des maisons individuelles. Les configurations verticales sont très bien développées à l'étranger et l'on commence à voir des réalisations en France. Ces systèmes sont plus coûteux mais sont plus performants. De plus, leur emprise au sol est nettement plus réduite et peuvent donc

convenir pour chauffer, voire rafraîchir, des maisons individuelles, mais surtout de petits ensembles de logements et d'immeubles de bureaux dont la surface environnante est limitée (ADEME, 2007).

Pompe à chaleur prélevant de l'énergie sur l'eau : L'énergie est prélevée sur l'eau de nappes aquifères peu profondes (moins de 100 m) captée par forage. Pour les systèmes à un seul forage, l'eau de nappe prélevée est rejetée dans une rivière, un plan d'eau ou un réseau d'eaux pluviales après qu'on y ait prélevé les calories nécessaires. Le système à deux forages est plus coûteux mais davantage utilisé car il évite le rejet en surface de l'eau prélevée dans la nappe. Le deuxième forage sert à réinjecter l'eau dans la nappe. En règle générale, ces PAC sont plutôt destinées à des immeubles de taille importante.

1.3.3.3 Systèmes évaporatifs

Système évaporatif indirects : Cette technique consiste à refroidir l'air insufflé (air « neuf » de ventilation) à partir d'un échange avec un air secondaire (air repris) qui est lui-même refroidi par un humidificateur avant de passer dans l'échangeur

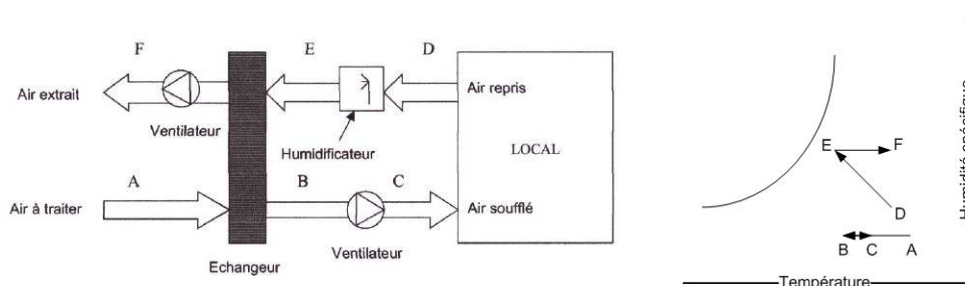


Figure 1.17 : Schéma de principe d'un système évaporatif indirect et transformation de l'air sur le diagramme de psychrométrie (ADEME, 2007)

Selon une étude réalisée par le CSTB et l'école des mines de Paris (Bohler et al, 2003), ce système s'avère être peu adapté dans le sud de la France et inefficace dans l'extrême sud-est, même avec des enveloppes de bâtiment performantes.

Si les coûts d'investissement et de fonctionnement sont relativement faibles par rapport à une climatisation classique, il faut toutefois faire attention à la consommation de la pompe d'eau et au coût de l'eau elle-même. En effet, ces systèmes consomment beaucoup d'eau. L'incidence sur le coût de fonctionnement peut être importante. La maintenance d'un tel système demande des soins particuliers : humidificateur, échangeur, même s'il n'y a pas de contact direct entre l'air insufflé et l'air humidifié. Deux ventilateurs interviennent également dans ce dispositif ; leur consommation doit être réduite au maximum, même si les débits transportés sont relativement faibles (proches des débits hygiéniques). L'échangeur air-air peut servir comme récupérateur de chaleur en hiver (ADEME, 2007).

Le coefficient de performance de ces systèmes, défini comme étant le ratio de la puissance de rafraîchissement sur la puissance des ventilateurs et de la pompe, est proche de 5. La consommation d'eau est de 3 l/kWh (Bohler et al, 2003).

Le dessiccant cooling: La Figure 1.18 montre une installation dessiccante couplée avec l'installation solaire. Cette installation comprend une roue en parallèle avec un échangeur rotatif avec des humidificateurs des deux côtés de l'air : côté soufflage et côté extraction. Ce système permet le refroidissement et la déshumidification de l'air sans l'utilisation de réfrigérant. La roue dessiccante contient un matériau dessiccant (par exemple du Chlorure de Lithium) qui a besoin d'être régénéré en utilisant une source de chaleur extérieure. Cette chaleur peut être fournie par une installation solaire, qui comprend un ballon de stockage et des capteurs solaires. Puisque la température de régénération requise n'est pas élevée (40 à 70 °C), des capteurs liquides plats peuvent être utilisés (VITTE 2007, MAALOUF 2007).

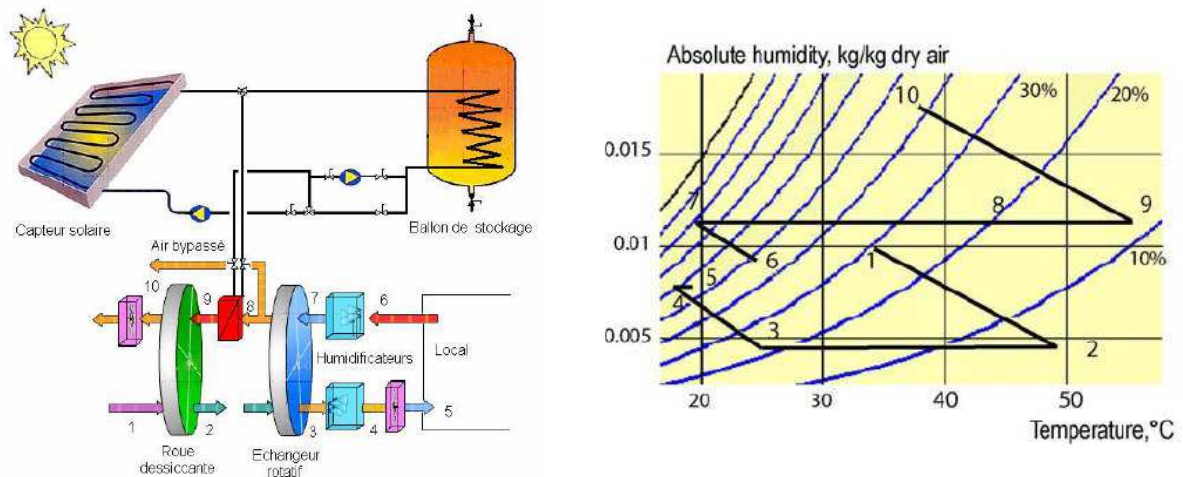


Figure 1.18 : Schéma d'une installation dessiccante couplée à une installation solaire et transformation de l'air humide sur le diagramme psychométrique (MAALOUF, 2007)

Selon les conditions de l'air extérieur et du local, l'installation de traitement d'air peut avoir cinq modes de fonctionnement (MAALOUF 2007):

- La ventilation. Le ventilateur de soufflage (4-5) est en opération.
- L'humidification directe. L'air extérieur est humidifié (3-4) avant d'être soufflé dans le local.
- L'humidification indirecte. L'air extérieur est refroidi sensiblement dans l'échangeur rotatif sensible (2-3). De l'autre côté de l'échangeur, l'air extrait du local est refroidi par humidification
- L'humidification combinée directe-indirecte. Les deux humidificateurs sont en fonctionnement avec l'échangeur rotatif sensible.
- Le mode dessiccant. L'air extérieur est déshumidifié dans la roue dessiccante. Pendant l'absorption de la vapeur d'eau, l'air est presque déshumidifié adiabatement (1-2). Ensuite il est refroidi dans l'échangeur rotatif sensible et dans l'humidificateur (3-4). L'air de retour est refroidi par humidification (6-7) et il est utilisé pour refroidir l'air de soufflage dans l'échangeur rotatif (7-8), ensuite il est chauffé dans le régénérateur par l'énergie fournie par l'installation solaire (8-9) pour régénérer la roue dessiccante (9-10).

1.3.3.4 Systèmes solaires

Le soleil constitue la principale et la plus disponible source d'énergie renouvelable en France (voir Figure 1.19). A côté de l'architecture solaire et/ou bioclimatique qui est l'un des piliers des bâtiments à basse consommation, une utilisation plus active de l'énergie solaire s'est développée pour la production de l'ECS et le chauffage (Chauffe Eau Solaire Individuel et Système Solaire Combiné), et pour la production de l'électricité grâce aux cellules photovoltaïques.

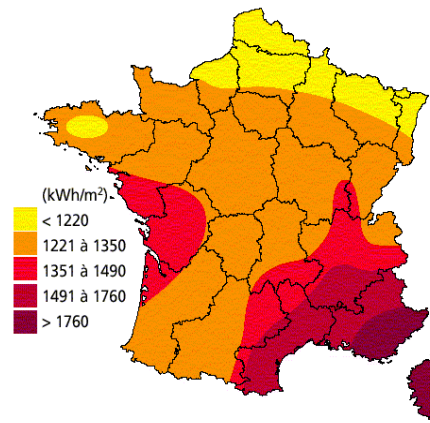


Figure 1.19 : Le gisement solaire en France (ADEME, 2007)

L'énergie solaire peut être également utilisée dans des installations de refroidissement. Les technologies du froid solaire actuellement disponibles pour des applications commerciales sont : la climatisation solaire par absorption et le rafraîchissement évaporatif par sorption ou dessiccant cooling (voir §1.3.3.3).

La climatisation solaire par absorption : Cette technique consiste à transformer l'énergie solaire en énergie thermique au moyen d'un capteur solaire sous vide. La chaleur ainsi produite est dirigée vers une pompe à chaleur à absorption où est dissociée, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit, par absorption de chaleur, des frigories. Cette énergie est ensuite utilisée pour refroidir le bâtiment.

Chauffe Eau Solaire Individuel (CESI) : c'est l'application la plus simple de l'énergie solaire. Elle comprend des capteurs solaires placés le plus souvent en toiture, et un ballon de stockage. L'eau glycolée, chauffée par le capteur solaire, transfère sa chaleur à l'eau d'un ballon de stockage grâce à un échangeur. Pour relier les capteurs et le ballon, une tuyauterie assure la circulation du liquide caloporteur. Pour compléter le système, on lui associe selon les modèles, un échangeur intégré au ballon, une régulation, une pompe de circulation et un dispositif de chauffage d'appoint (voir Figure 1.20).

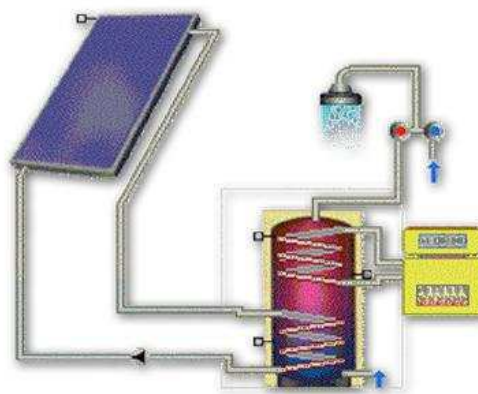


Figure 1.20 : Schéma de principe d'un CESA (Appoint chaudière) (ADEME, 2006a)

L'ADEME a financé le suivi de 120 CESA de manière qualitative et quantitative sur une période minimale de 12 mois (ADEME, 2006a). Cette étude a conclu qu'un chauffe-eau solaire permet de couvrir environ 60% des besoins annuels en ECS d'une famille. Il permet d'économiser par an de l'ordre de 2000 kWh d'énergie primaire et d'éviter de rejeter dans l'atmosphère de l'ordre de 200 kg de CO₂, les résultats dépendent beaucoup du type de l'énergie d'appoint. Les économies réalisées sont liées à la consommation d'eau chaude ainsi qu'à la gestion de l'appoint, notamment de sa température de consigne.

En 2005, le prix d'un chauffe-eau solaire individuel standard équipé de 3 à 5 m² de capteurs et d'un ballon de 200 à 300 litres (3 à 5 personnes en fonction des régions d'implantation), était compris entre 3800 et 5500 € TTC, pose comprise et sans tenir compte des subventions. Les installations de CESI pour les résidences principales bénéficient d'un crédit d'impôt dans les conditions prévues par un arrêté ministériel spécifique (ADEME, 2007).

Systèmes Solaires Combinés (SSC) : Un système solaire combiné (SSC) est un système qui fournit de l'énergie pour deux utilisations, à savoir le chauffage des locaux, production d'eau chaude sanitaire. La source d'énergie principale est l'énergie solaire complétée par un appoint (voir Figure 1.21).

Parmi ces systèmes, on trouve en particulier les systèmes dits « Planchers Solaires Directs » (PSD), qui permettent de combiner ECS et chauffage en habitats résidentiels et bâtiments tertiaires. Le principe de fonctionnement est le suivant : l'eau chauffée par les capteurs solaires est acheminée via un module de transfert (composé d'éléments classiques : pompes de circulation, vase d'expansion, vannes, purges, régulation...), dans un plancher chauffant basse température. Si l'ensoleillement est insuffisant, des thermostats d'ambiance déclenchent le réseau d'appoint. Pour fournir un chauffage relativement constant tout au long de la journée, malgré l'intermittence du rayonnement solaire, le PSD utilise l'inertie et la capacité de stockage de la dalle en béton.

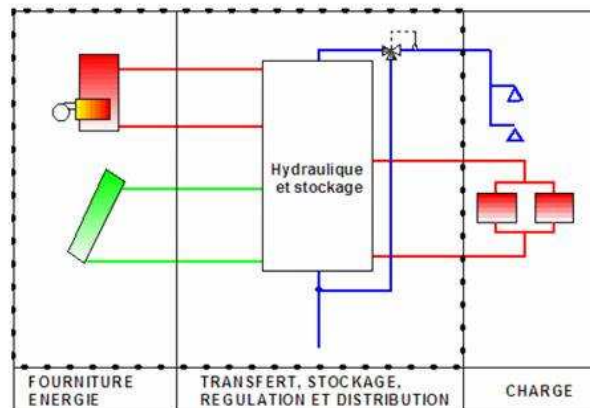


Figure 1.21 : Schéma de principe d'un SSC (limites du système en pointillés), (ADEME, 2006b)

Une campagne de suivi, financée par l'ADEME, a été réalisée entre 2003 et fin 2005 sur 32 installations de 4 marques différentes en maison individuelle. Les SSC étaient répartis sur 7 régions (Alsace, Bretagne, Franche Comté, Midi Pyrénées, Paca, Pays de la Loire et Rhône Alpes). Globalement, pour les installations les plus performantes, les principaux ordres de grandeurs suivants ont été mis en évidence (ADEME, 2006b):

- Pour un projet moyen comportant une surface de capteurs solaire de l'ordre de 15 m², situé dans un climat moyen, ce sont plus de 5000 kWh qui sont économisés annuellement. Avec des conditions favorables telles que climat de montagne froid et ensoleillé, ces valeurs peuvent être sensiblement plus importantes.
- Par contre, il est beaucoup plus difficile de donner un ratio moyen pour le taux d'économie d'énergie, qui, compte tenu de la grande variabilité des projets et des climats, s'échelonne entre 10 et 50 %, voire plus dans certains cas très favorables.

Les SSC installés dans les résidences principales bénéficient d'un crédit d'impôt (ADEME, 2007).

Solaire photovoltaïque : Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium, qui transforment directement la lumière du

rayonnement solaire en énergie électrique. Les technologies photovoltaïques se divisent en deux grandes familles :

- Le silicium cristallin, technologie éprouvée et robuste (espérance de vie 30 ans), dont le rendement est de l'ordre de 13 %, adaptée à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. On distingue le silicium polycristallin et le silicium monocristallin, plus efficace mais plus onéreux ;
- Le silicium amorphe, meilleur marché, qui est destiné à des usages autonomes et des petites puissances.

L'électricité produite peut être soit consommée sur place, soit renvoyée sur le réseau électrique. Le rendement de conversion entre la puissance électrique et la puissance lumineuse est d'environ de 8% à 15% pour les cellules actuellement disponibles sur le marché. Dans les laboratoires de recherche, certaines cellules atteignent actuellement des rendements allant jusqu'à 30%. La température de la cellule a une grande influence sur son rendement. Plus une cellule est froide, plus elle est efficace. Chaque degré de réchauffement occasionne une perte de rendement d'environ 0,5%. Les fabricants indiquent le rendement pour une température de cellule de 25°C. Lorsque le rendement de conversion photovoltaïque est de 15% à 25°C, il est d'environ 13% à 50°C et de 16% à 10°C (Chlela et al, 2005).

Le marché du photovoltaïque ne cesse de croître. Le décollage du marché du photovoltaïque raccordé au réseau en France est remarquablement rapide, mais est encore faible par rapport à d'autres pays européens (environ 100 fois moins qu'en Allemagne). En France, actuellement, plus de 10000 foyers bénéficient de l'électricité photovoltaïque. Plus de 7000 foyers éloignés du réseau n'ont accès à l'électricité que par le biais de cette technologie et plus de 3000 particuliers raccordés au réseau vendent leur production d'électricité à EDF (ADEME, 2007).

Historiquement, le marché photovoltaïque français était un marché orienté vers les applications photovoltaïque en sites isolés. C'est à partir de 1999 grâce à l'implication des acteurs français du photovoltaïque et de l'ADEME au sein du projet européen HIP HIP¹ (Hip-Hip, 2000) que le marché français s'est réorienté vers les applications dites raccordé au réseau. Même si aujourd'hui les applications en sites isolés représentent toujours la majorité du parc français installé, le volume annuel financé en photovoltaïque raccordées au réseau a été au moins 10 fois plus important que celui installé en sites isolés en 2005. Pour la première fois en 2005, la puissance cumulée des applications photovoltaïques raccordées au réseau installée en France est plus importante que celle des sites isolés (ADEME, 2007).

Suivant le type d'intégration des panneaux solaires photovoltaïques, le prix de revente de la production électrique diffère. L'arrêté du 10 juillet 2006 fixe à 55 cts/kWh le prix de revente de la production électrique d'une installation solaire photovoltaïque pour les intégrations suivantes (liste exhaustive) :

- Toitures, ardoises ou tuiles conçues industriellement avec ou sans supports
- brises-soleils
- allèges
- verrières sans protection arrière
- gardes-corps de fenêtre, de balcon ou de terrasse

¹Le projet HIP HIP est un projet du 5e Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD) financé à hauteur de 35% par la Commission européenne, dont l'objectif était d'aider la croissance du marché du photovoltaïque raccordé au réseau et intégré au bâti (PRIB) par le développement de produits innovants et de procédures adaptées

- bardages, murs rideaux

Dans les autres cas, le prix de revente est de 30 cts/kWh qui est un tarif de base. Quelque soit le type d'intégration le contrat de revente de l'électricité à EDF est de 20 ans.

1.3.3.5 Unités compactes

Les besoins en chauffage limités des maisons passives ont permis le développement, notamment en Allemagne et en Suisse, de systèmes compacts qui rassemblent en un seul produit les fonctions de ventilation, chauffage et production d'eau chaude sanitaire. Ces nouveaux systèmes constituent une famille de produits comportant généralement : une pompe à chaleur sur l'air extrait pour le chauffage d'un ballon d'eau chaude et un échangeur de chaleur à plaques entre l'air extrait et l'air neuf. L'eau chaude du ballon de stockage est destinée à la production d'eau chaude sanitaire et au préchauffage de l'air neuf. Le vecteur du chauffage est généralement l'air. Certains industriels proposent de coupler ce système compact à un puits climatique pour le préchauffage de l'air neuf, et à des capteurs solaires contribuant au chauffage du stockage d'eau chaude. La Figure 1.22 montre un exemple d'une unité compacte commercialisée en Allemagne par Effiziento (Effiziento, 2007).

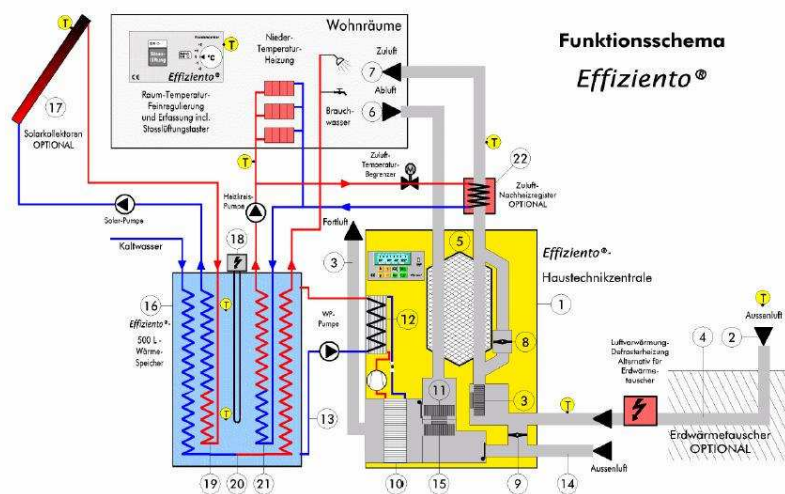


Figure 1.22 : Unité compacte utilisées dans les maisons passives (Effiziento, 2007)

Le principe de fonctionnement de la machine est le suivant :

- L'unité compacte (1) alimente le bâtiment en air neuf (7) et extrait simultanément l'air vicié (6). L'air neuf (2) est aspiré par le ventilateur centrifuge (3). Cet air passe par le puits climatique (4), où il est préchauffé pendant l'hiver et refroidi pendant l'été. Ensuite, l'air frais traverse l'échangeur de chaleur à contre-courant (5) où il récupère une partie de l'énergie de l'air extrait et est ensuite soufflé dans la maison comme air neuf (7). L'efficacité annoncée de l'échangeur est supérieure à 90%. En été, l'air frais est by-passé (8). En fonction de la température extérieure, l'amenée d'air frais peut s'effectuer soit par le puits climatique, soit directement par l'extérieur (14). Pour éviter les risques de givrage, une résistance électrique est utilisée à la sortie du puits climatique,
- L'air vicié (6), aspiré par le ventilateur centrifuge (11), traverse l'évaporateur (10) de la pompe à chaleur où il cède son énergie au fluide frigorigène de la PAC. Cette énergie est livrée à l'eau circulant dans le condenseur (12) en provenance du ballon de stockage (13). Le ventilateur aspire également de l'air en provenance de l'extérieur (14).

- Si l'énergie extraite de l'air vicié n'est pas suffisante, de l'air extérieur (14) est aspiré directement par le ventilateur centrifuge (15) pour couvrir le manque d'énergie.
- Le ballon de stockage (16) est chauffé par la pompe à chaleur, par des capteurs solaires (17) et par un appoint électrique (18). Ce ballon sert pour l'ECS et le chauffage (22).
- L'appoint pour le ballon de stockage peut être fourni par une chaudière classique.

Les systèmes compacts sont destinés aux maisons individuelles passives. Ils sont essentiellement installés dans les bâtiments neufs, mais leur utilisation peut se faire dans le cas d'une rénovation lourde. Les systèmes compacts ne sont pas encore utilisés dans le secteur tertiaire (CSTB, 2006).

Performances énergétiques : le Fraunhofer ISE a mené entre 2002 et 2004 des campagnes de mesure sur 27 maisons passives équipées de systèmes compacts avec panneaux solaires (CSTB, 2006).

Les résultats obtenus sur 21 maisons montrent que la consommation d'énergie électrique varie entre 5 et 42 kWh/m²an suivant les cas pour assurer le chauffage, la ventilation et l'eau chaude sanitaire, avec une moyenne de 16,9 kWh/m²an. Les différences entre les maisons peuvent avoir plusieurs explications : mauvais dimensionnement du système ; comportement des utilisateurs (consommation d'eau élevée, ouverture des fenêtres en hiver trop importante...) ; éventuels dysfonctionnements du système, etc.

Le COP nominal de la pompe à chaleur varie, selon le constructeur entre 2,5 à 4,3. Les efficacités annoncées de l'échangeur sont supérieures à 80% voire à 90% (Nardot, 2006).

Le prix moyen d'une unité compacte, ballon d'eau chaude compris, est de l'ordre de 10000€. Ce prix varie légèrement d'un constructeur à l'autre (Nardot, 2006).

1.3.3.6 Le bois – énergie

Le bois a été utilisé de façon immémoriale pour la cuisson des aliments puis le chauffage des logements. Depuis une vingtaine d'années, la production d'énergie à partir du bois a connu une évolution substantielle. En France, on peut distinguer trois grands secteurs d'utilisation (ADEME, 2006c) :

- l'usage domestique, qui comprend les appareils indépendants (cheminées à foyer ouvert, cuisinières, poêles, foyers fermés, inserts...) et les chaudières à eau chaude fournissant le chauffage et l'eau chaude sanitaire ;
- l'usage collectif, qui a débuté après les chocs pétroliers des années 70-80 ; il suppose généralement la création de chaufferies à alimentation automatique fournissant le chauffage et l'eau chaude sanitaire à plusieurs logements, ou à des bâtiments desservis par un même générateur thermique via un réseau de chaleur ;
- l'usage industriel, qui comprend d'une part, l'utilisation de déchets de bois par une entreprise pour ses besoins propres en chauffage et en process, d'autre part, la production de chaleur et d'électricité (cogénération) dans des unités de forte puissance.

Le bois - énergie dans les maisons individuelles : le chauffage au bois des habitats individuels est réalisé par de nombreuses technologies comme les poêles, cheminées, chaudières utilisant une vaste gamme de biocombustibles, tels que les bûches, briquettes, granulés, voire des plaquettes forestières.

Le bois - énergie dans l'habitat collectif et le tertiaire : par rapport au chauffage domestique et aux chaufferies dans les industries du bois, le bois - énergie dans l'habitat collectif et le tertiaire demeure très minoritaire (quelques centaines d'installations en fonctionnement). Une chaufferie à alimentation automatique peut fournir de la chaleur :

- soit à un ensemble de logements collectifs ou à un établissement public (hôpital, maison de retraite...) ;
- soit à un réseau de chaleur desservant plusieurs usagers (immeubles et équipements publics).

Les installations de chauffage collectif au bois, généralement en bi-énergie (bois + fioul ou gaz) se situent en France dans des gammes de puissance allant de quelques centaines de kW à 9 MW (Vitry-le-François, 3000 logements, 20000 tonnes de bois par an). De nombreuses réalisations exemplaires ont vu le jour au cours des dernières années. Dans le petit collectif en milieu rural, on trouve des chaudières automatiques à bois déchiqueté ou des chaudières à bûches à alimentation manuelle (puissance ≤ 200 kW), fonctionnant également en bi-énergie (bois/fioul ou gaz) (ADEME, 2006c).

1.3.3.7 Les éoliennes

Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie mécanique a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moudre le grain. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau). L'application « connecté réseau » ou « grand éolien » représente, en terme de puissance installée, la quasi totalité du marché éolien français (ADEME, 2004).

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Pour le « grand éolien », on utilise des machines à axe horizontal ; elles se composent, dans la plupart des applications, d'un rotor tripale. Les technologies de conversion et de contrôle peuvent différer d'une machine à l'autre. Les gammes de puissance nominale vont de 1 à 5 MW. Les éoliennes à axe horizontal sont plus performantes que celles à axe vertical essentiellement en termes de rendement aérodynamique et de coût de maintenance. La puissance totale installée en France est estimée à 1,3 GW (ADEME, 2004).

Le grand éolien : Il s'agit d'éoliennes constituées d'un mât de 50 à 110 m de haut, avec à leur sommet une nacelle équipée d'un rotor à axe horizontal et à trois pales mises en rotation par le vent. Le vent fait tourner les pales, entre 10 et 25 tours par minute environ. L'énergie mécanique ainsi produite est transformée en énergie électrique dans la nacelle grâce à une génératrice. Les nouvelles éoliennes installées en France développent en général une puissance d'environ 2 MW.

Le petit éolien : Le petit éolien dit éolien individuel ou encore éolien domestique, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 20 kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...), principalement en milieu rural.

1.3.3.8 La micro-cogénération

La cogénération (CHP, « Combined Heat and Power ») est la production simultanée d'une énergie mécanique le plus souvent transformée en électricité et d'une énergie thermique à partir d'une source unique d'énergie primaire. La cogénération permet une économie sur la consommation d'énergie primaire par rapport à une fourniture énergétique équivalente à partir de procédés dissociés.

La micro-cogénération concerne les installations de faible puissance. La Directive européenne 2004/8/CE concernant la promotion de la cogénération a fixé à 50 kWe le seuil en dessous duquel on parle de micro-cogénération. En France, étant données les plages d'abonnement EDF et les contrats de raccordement, le seuil de la micro cogénération a été fixé à 36 kWe. Enfin, le projet de norme Pr NF EN 50438 sur les «Prescriptions pour le raccordement de micro générateurs en parallèle avec les réseaux publics de distribution basse-tension» concerne les équipements dont la production électrique est inférieure à 10 kWe (CSTB et al, 2006).

En 2005, environ 16000 modules de micro cogénération de puissance inférieure à 5 kWe auraient été vendus à travers le monde, représentant une puissance installée de 31 MWe. Sur ce total, 75% se trouve sur le marché Japonais et 20% sur le marché Allemand. La différence la plus flagrante entre le contexte énergétique français et ceux des autres pays est le contenu en carbone de l'électricité. L'électricité nucléaire décarbonnée ne laisse pas beaucoup de place à la production d'électricité à partir d'énergie fossile. La micro-cogénération à partir d'énergie fossile, ne fait qu'augmenter les émissions de gaz à effet de serre en France alors qu'elle les réduit dans les autres pays. Elle bénéficie donc du soutien financier des états pour respecter les engagements de Kyoto, ce qui ne peut être le cas en France (CSTB et al, 2006).

1.3.4 Usages

Les consommations des usages dans le secteur tertiaire constituent une part importante du bilan énergétique total (26% en 2001, voir Tableau 1.2). Les usages regroupent principalement les équipements de bureautique et l'éclairage artificiel.

Les équipements de bureautique : Leur part dans la consommation électrique est celle qui a la croissance la plus rapide. La réduction des consommations d'électricité de ces appareils peut être réalisée via les solutions suivantes (ADEME 2007, CSTB et ARMINES 2005):

- Le paramétrage des options concernant la gestion de l'alimentation d'un ordinateur de bureau permet de désactiver le moniteur voire les disques durs après une certaine durée d'inactivité. Le label EnergyStar indique que la gestion de l'alimentation permet de réduire de 70% les consommations électriques d'un ordinateur, de réduire de 90% les consommations électriques d'un moniteur, de réduire de 60% les consommations d'une imprimante. Les ordinateurs portables consomment 50 à 80 % d'énergie en moins que les postes fixes. Les écrans plats à cristaux liquides consomment 60 % d'énergie en moins, en mode « marche », que les écrans à tube cathodique. Ces matériels moins énergivores sont malgré tout plus chers à l'achat.
- Les équipements supplémentaires tels que les imprimantes, les scanners, ... doivent être centralisés afin d'une part de limiter le matériel installé et d'autre part de multiplier ce type d'appareils.
- Les équipements multifonctions consomment moins que la somme des appareils qu'ils remplacent. A titre d'exemple, une imprimante ayant également la fonction de scanner, de fax et de photocopieur consomme 50 % de moins d'énergie que les appareils séparés.

Eclairage artificiel : les consommations d'électricité dues à l'éclairage artificiel peuvent être réduites par le biais des solutions suivantes :

- L'éclairage naturel, éclairage plus agréable et gratuit, doit être favorisé sans pour autant gêner les usagers. Ce type d'éclairage n'a d'intérêt au plan énergétique que s'il est pris en compte dans la gestion de l'éclairage artificiel. Il est cependant difficile

à maîtriser en raison de l'extrême variabilité des conditions extérieures et des risques d'éblouissement par le soleil. Il dépend :

- de la localisation ;
- de l'environnement du bâtiment (masques lointains);
- de l'architecture ;
- de l'orientation, de la position, de la surface et de l'inclinaison des prises de jour ;
- du choix des matériaux constitutifs des prises de jour ;
- des protections solaires

L'étude de l'éclairage naturel d'un bâtiment doit prendre en compte les éléments suivants :

- la limitation des apports solaires qui constituent une charge de refroidissement,
 - les risques d'éblouissement,
 - les contrastes de luminance entre prises de jour et parois intérieures,
 - l'homogénéité de l'éclairage.
- Utilisation d'un éclairage artificiel plus efficace tel que celui de catégorie A. A titre d'exemple, l'efficacité lumineuse d'une ampoule à incandescence est comprise entre 12 et 20 lm/W alors que celle des lampes fluorescentes est comprise entre 40 et 100 lm/W (CSTB et ARMINES, 2005).
 - Gestion de l'éclairage artificiel : la réduction de la puissance électrique installée doit s'accompagner d'un pilotage optimal de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel. Il existe plusieurs modes de gestion de l'éclairage artificiel (interrupteur, gradateur, capteur de présence, ...). Les expériences montrent que dans un bureau il est préférable que l'occupant soit le gestionnaire de l'éclairage artificiel et qu'il doit donc disposer d'une commande (Galasiu et Veitch, 2006). En période d'inoccupation, l'éclairage doit être éteint avec dérogation possible par minuterie. Pour les locaux à occupation passagère (sanitaires, circulations,...), la mise en place de détecteurs de présence afin de réduire les consommations d'électricité dédiées à l'éclairage est recommandée.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte énergétique du secteur du bâtiment, la réglementation thermique et les labels français. Ensuite, nous avons dressé l'état de l'art des opérations internationales en termes de labels, d'applications et de technologies. Cet état de l'art montre que les démarches entreprises sur les bâtiments à basse consommation d'énergie, reposent sur un même principe, à savoir, la réduction des besoins énergétiques et la production du complément des besoins via de systèmes efficaces utilisant diverses sources d'énergie, y compris des énergies renouvelables.

Les besoins de chauffage sont réduits grâce à une amélioration de l'isolation thermique, la réduction des ponts thermique, et une bonne étanchéité à l'air. En plus, les déperditions par ventilation sont diminuées grâce à un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. La ventilation double flux est souvent couplée à une installation de puits climatique qui sert à préchauffer l'air neuf et protéger la centrale double flux des risques de givrage. Les apports gratuits fournis par le soleil, les occupants et les équipements sont également récupérés.

Le confort d'été est traité par des solutions passives, associées dans certains cas à des systèmes de rafraîchissement performants. L'air neuf est rafraîchi à l'aide d'un puits climatique et les apports solaires sont réduits à l'aide de protections solaires. De plus, le couplage surventilation nocturne - inertie thermique permet d'évacuer toute la chaleur

excédentaire accumulée en journée et de stocker des frigories dans la structure pour la période d'occupation.

Le Tableau 1.15 présente des exemples de technologies rencontrées dans les bâtiments à basse consommation d'énergie. Certaines de ces technologies sont limitées à un type bien spécifique de bâtiments. A titre d'exemple, l'utilisation des façades doubles peau est plutôt limitée aux bâtiments tertiaires alors que celle des unités compactes au secteur résidentiel.

Pompe à chaleur prélevant de l'énergie sur l'air
Pompe à chaleur prélevant de l'énergie sur l'eau
Pompe à chaleur prélevant de l'énergie sur le sol
Capteur solaire thermique
Capteur solaire photovoltaïque
Climatisation solaire
Dessiccant cooling
Système évaporatif indirect
Eolienne
Ventilation double flux avec échangeur sur l'air extrait
Puits climatique
Free cooling
Unité compacte
Micro cogénération
Chauffage au bois
Matériaux à changement de phase (MCP)
Façade double peau

Tableau 1.15 : Exemple de technologies utilisées dans les bâtiments à basse consommation d'énergie

L'état de l'art réalisé a permis de mettre en évidence les solutions adoptées pour concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie. Afin de pouvoir analyser numériquement ce type de solutions dans le contexte climatique français, il s'avère nécessaire de disposer d'un outil de simulation numérique adapté. A cet effet, nous présentons dans le chapitre suivant les modèles développés ainsi que l'environnement informatique utilisé.

Développement de modèles numériques dans la bibliothèque SIMBAD

Les outils de simulation numérique occupent une place prépondérante dans les études en thermique du bâtiment. Les démarches de conception énergétique optimale, qui résultent de l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et du souci de préservation de l'environnement, n'ont fait qu'amplifier leur utilisation.

Plusieurs outils de simulation en thermique du bâtiment sont disponibles. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, les outils suivants : TRNSYS (TRNSYS 16, 2005), ESP-r (ESP-r, 2006), ConsoClim (ConsoClim, 2000), ThCE (ThCE, 2005).

Le CSTB travaille depuis plusieurs années sur le développement de modèles de bâtiments et de composants de systèmes de génie climatique (Husaunndee et al, 1997). Ces efforts ont donné naissance à la bibliothèque de modèles SIMBAD «SIMBAD Buildings and HVAC Toolbox» qui a déjà été utilisé dans de nombreuses études en thermique du bâtiment (Vaézi-Nejad et al, 2000), (Husaunndee et al, 2001), (Lahrech et al, 2001), (Riederer et al, 2001a), (Riederer et al, 2001b), (Jreijiry, 2004), (Couillaud, 2006).

L'intégration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments a contribué au développement de nouveaux concepts de construction d'enveloppe et d'installations de génie climatique. Ceci exige une amélioration dans les outils de simulation pour permettre d'évaluer l'impact de ces nouvelles technologies sur les performances énergétiques des bâtiments. Dans ce contexte, l'un des objectifs de ce travail est de contribuer au développement de la bibliothèque SIMBAD, en y intégrant de nouveaux modèles de composants d'enveloppe et de systèmes de génie climatique, spécifiques aux bâtiments à basse consommation d'énergie. De plus, ces modèles sont nécessaires pour le développement de la méthodologie.

Dans ce chapitre, nous décrivons les différents modèles intégrés dans la bibliothèque SIMBAD. Nous présentons également des exemples d'étude d'évaluation énergétiques de bâtiments, réalisées à l'aide des modèles développés.

2.1 La bibliothèque SIMBAD

La bibliothèque SIMBAD est développée dans l'environnement informatique MATLAB/SIMULINK (MATLAB, 2005). Cet environnement est de plus en plus utilisé pour la modélisation en physique du bâtiment. Parmi les applications dans ce domaine, nous pouvons citer :

- Etude des stratégies de rafraîchissement passif (Paassen et al, 1998),
- Evaluation des performances énergétiques du bâtiment (Mendes et al, 2001),
- Couplage MATLAB -TRNSYS pour l'optimisation des stratégies de contrôle (Kummert et al, 1997),
- Etude des stratégies de ventilation avec des systèmes à débit d'air variable (Sorensen, 2002),
- Etude des stratégies de contrôle de la ventilation hybride avec un modèle monozone (Cron et al, 2002).
- Couplage d'un capteur solaire thermique avec une pompe à chaleur pour le chauffage d'une maison individuelle (Schijndel et al, 2003).
- Modélisation numérique des systèmes de ventilation hybride et développement de stratégies de contrôle associées pour les bâtiments résidentiels (Jreijiry, 2004)
- Optimisation des réseaux hydrauliques (Couillaud, 2006).

En plus des sous groupes contenant les modèles du bâtiment et les modèles de composants des systèmes de génie climatique, la bibliothèque SIMBAD contient des sous groupes de modèles qui représentent l'environnement du bâtiment et des systèmes ainsi que d'autres utilitaires, à savoir des fichiers météorologiques, des fonctions de calcul des propriétés physiques de l'air, des interfaces de communication avec des composants réels (actionneurs, régulateurs,...).

Les principaux sous groupes de modèles de la bibliothèque SIMBAD sont (voir Figure 2.1) :

- **Modèle multizone** : modèle de bâtiment multi zone. La description du bâtiment est réalisée à l'aide d'une interface graphique,
- **Modèles de zone** : modèles de bâtiment monozone avec des paramètres prédéfinis, modèles avec une description détaillée des parois et des fenêtres ou description zonale de l'ambiance intérieure,...
- **Eléments de production** : pompes à chaleur, chaudière,...
- **Eléments de distribution** : récupérateurs de chaleur à plaques, vannes, conduits, pompes, gaines d'air...
- **Eléments d'émission** : ventilo-convecteurs, plancher-chauffants, radiateurs, convecteurs électriques,...
- **Eléments de régulation** : différents types de régulateurs pour la régulation terminale ou centrale, sondes.

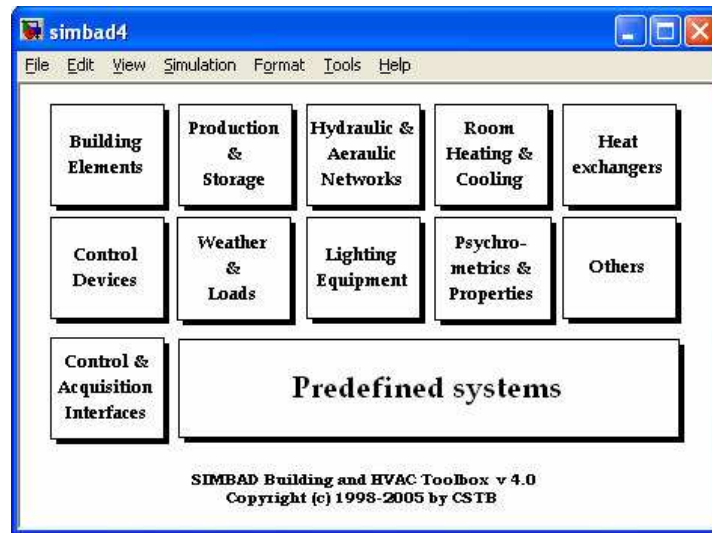


Figure 2.1 : SIMBAD Building and HVAC Toolbox dans l'environnement SIMULINK

L'un des objectifs de ce travail est le développement de la bibliothèque SIMBAD dans le but de pouvoir évaluer certains modes de construction et systèmes du génie climatique permettant de réduire les consommations d'énergie des bâtiments. Dans ce contexte, les travaux suivants ont été réalisés :

- Amélioration du modèle de bâtiment multizone :
 - Intégration d'un modèle de masques proches verticaux et horizontaux
 - Intégration d'un modèle d'infiltration d'air
- Intégration d'un modèle de matériaux à changement de phase
- Intégration de modèles d'échangeurs géothermiques
- Intégration d'un modèle d'échangeur à plaques air – air
- Intégration d'un modèle de pompe à chaleur

2.2 Le modèle de bâtiment multizone

Le modèle de bâtiment de SIMBAD est un modèle dynamique multizone développé par (EL Khoury et al, 2004). Ce modèle a été validé par rapport à d'autres modèles et des données expérimentales (EL Khoury et al 2005, Neymark et Judkoff 2004, Neymark 2004).

Nous présentons par la suite, les équations de base du modèle de bâtiment, ainsi que les deux composants que nous lui avons intégrés, à savoir le modèle de masques proches et le modèle d'infiltration d'air.

2.2.1 Equations de base du modèle

2.2.1.1 Bilan thermique et hydrique d'une zone

Une zone thermique correspond à une pièce ou à un ensemble de pièces. Elle est supposée homogène en température et en humidité.

Considérons une zone thermique i de volume V_i , dont l'air est à la température $T_{a,i}$ et dont l'humidité spécifique est ω_i . Le bilan thermique d'une zone prend en compte les échanges convectifs entre l'air et les parois, les gains convectifs dus aux équipements et les puissances convectives dues à la ventilation, aux infiltrations d'air et aux couplages aérauliques avec les autres zones.

La Figure 2.2 illustre les différents flux de chaleur pris en compte dans le bilan thermique d'un nœud de température d'air.

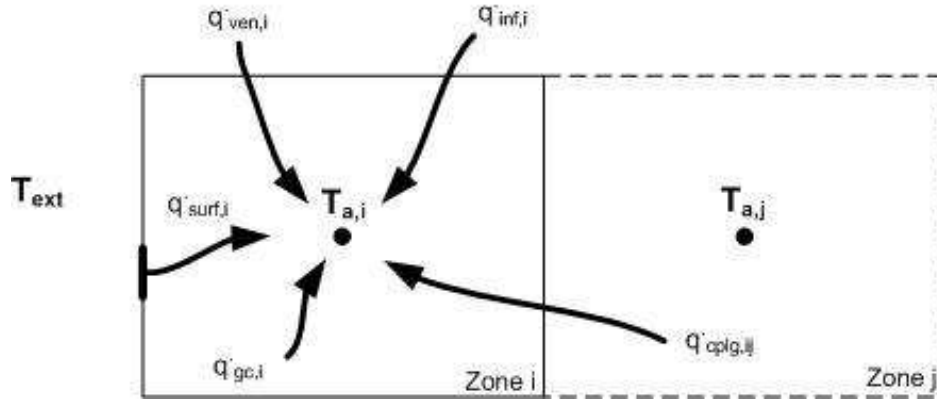


Figure 2.2 : Bilan thermique d'un nœud de température d'air

Le bilan thermique convectif de la zone i s'écrit ainsi :

$$\rho_a V_i C_{p,a} \frac{dT_{a,i}}{dt} = q_{s,i} + q_{vent,i} + q_{inf,i} + q_{cplg,i} + q_{gc,i} \quad (2.1)$$

Avec :

- $q_{s,i}$ flux de chaleur par convection provenant de toutes les surfaces intérieures :

$$q_{s,i} = \sum_p h_{conv,p} A_p (T_{s,p} - T_{a,i}) \quad (2.2)$$

- $q_{vent,i}$ flux de chaleur par convection provenant du renouvellement d'air par ventilation :

$$q_{vent,i} = \sum_j \dot{m}_{vent,j} C_{p,a} (T_{vent,p} - T_{a,i}) \quad (2.3)$$

- $q_{inf,i}$ flux de chaleur par convection provenant des infiltrations d'air à travers les défauts d'étanchéité :

$$q_{inf,i} = \dot{m}_{inf,i} C_{p,a} (T_{ext} - T_{a,i}) \quad (2.4)$$

- $q_{cplg,i}$ flux de chaleur par convection dû aux couplages aérauliques avec les autres zones :

$$q_{cplg,i} = \sum_j \dot{m}_{ji} C_{p,a} (T_{a,j} - T_{a,i}) \quad (2.5)$$

- $q_{gc,i}$ gains internes convectifs dus aux équipements et aux occupants.

Le bilan radiatif de la zone thermique fait intervenir la notion de température radiante moyenne. La température radiante moyenne T_{rm} est obtenue à partir de la moyenne pondérée par leurs surfaces respectives de chaque température de surface intérieure de la zone considérée. En l'absence de puissance radiative directement injectée sur le nœud de température radiante moyenne, le bilan radiatif de la zone i s'écrit :

$$\sum_p h_{rad,p} A_p (T_{s,p} - T_{rm,i}) = 0 \quad (2.6)$$

Dans la zone thermique transitent différents débits d'air correspondant aux infiltrations d'air à travers les défauts d'étanchéité, au système de traitement d'air, au système de

renouvellement d'air et aux couplages aérauliques avec les autres zones. De plus, du fait de l'occupation et d'autres activités, il existe une production de vapeur d'eau, notée G_i . En faisant abstraction de l'inertie hygroscopique des parois et des meubles, le bilan hydrique de la zone i s'écrit :

$$\rho_a V_i \frac{d\omega_i}{dt} = \dot{m}_{\text{inf},i} \omega_{\text{ext}} - \dot{m}_{\text{extr},i} \omega_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{m}_{ji} \omega_j - \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{m}_{ij} \omega_i + G_i \quad (2.7)$$

2.2.1.2 Modélisation des parois opaques

Le transfert de chaleur à travers une paroi opaque est considéré comme étant unidimensionnel. Le modèle de paroi utilise l'analogie électrique pour déterminer les températures internes et de surface d'une paroi multicouche soumise à des sollicitations thermiques des deux côtés. Ces températures sont calculées à partir d'un système d'équations différentielles en fonction du rayonnement de courte et de grande longueur d'onde et des températures d'air (voir Figure 2.3).

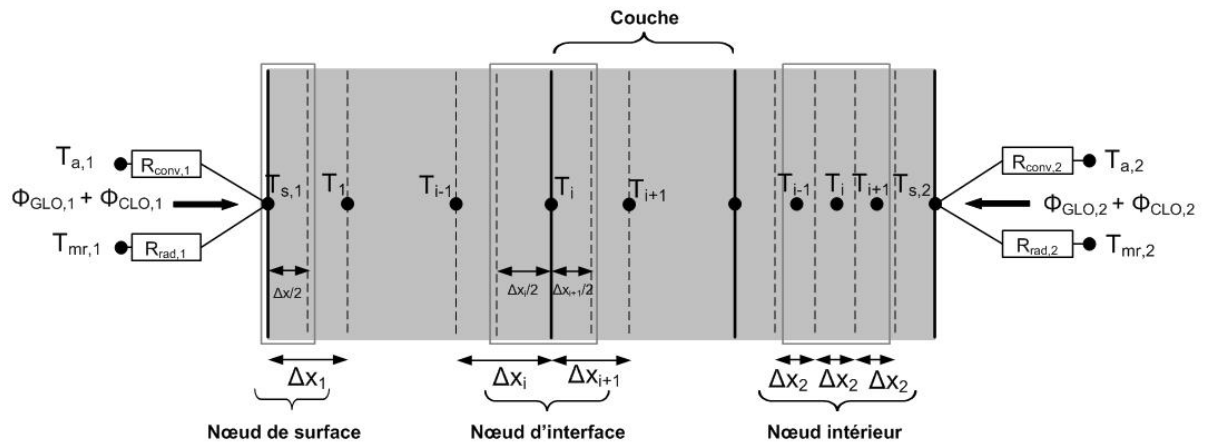


Figure 2.3 : Discretisation nodale du modèle de paroi

Le bilan thermique d'un nœud intérieur i est exprimé à l'aide de l'équation (2.8) :

$$(\rho C_p \Delta x) \frac{dT_i}{dt} = \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{i-1} - T_i) + \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{i+1} - T_i) \quad (2.8)$$

Le bilan thermique d'un nœud à l'interface de deux couches est exprimé comme suit :

$$(\rho_{i-1} C_{p,i-1} \frac{\Delta x_i}{2} + \rho_{i+1} C_{p,i+1} \frac{\Delta x_{i+1}}{2}) \frac{dT_i}{dt} = \frac{\lambda_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} (T_{i-1} - T_i) + \frac{\lambda_{i+1}}{\Delta x_{i+1}} (T_{i+1} - T_i) \quad (2.9)$$

Le bilan thermique des deux nœuds de surface prend en compte les échanges convectifs avec l'air ambiant et les échanges radiatifs de courte et de grande longueur d'onde. Ainsi, le bilan thermique pour les deux nœuds de surface s'écrit :

$$\begin{cases} \left(\rho_1 C_{p1} \frac{\Delta x_1}{2} \right) \frac{dT_{s,1}}{dt} = \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} (T_1 - T_{s,1}) + h_{\text{conv},1} (T_{a,1} - T_{s,1}) + h_{\text{rad},1} (T_{\text{rm},1} - T_{s,1}) + \phi_{\text{CLO},1} + \phi_{\text{GLO},1} \\ \left(\rho_2 C_{p2} \frac{\Delta x_2}{2} \right) \frac{dT_{s,2}}{dt} = \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} (T_n - T_{s,2}) + h_{\text{conv},2} (T_{a,1} - T_{s,2}) + h_{\text{rad},2} (T_{\text{rm},2} - T_{s,2}) + \phi_{\text{CLO},2} + \phi_{\text{GLO},2} \end{cases} \quad (2.10)$$

Le terme Φ_{GLO} représente le flux de chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde dû aux à la puissance du système de chauffage et aux gains internes.

2.2.1.3 Modélisation des baies vitrées

Les baies vitrées sont représentées par un modèle nodal monodimensionnel. Un nœud de température est associé à chaque face de la baie. Le modèle prend en compte les protections solaires mobiles. Le calcul des températures de surface s'effectue séparément pour la partie protégée et pour la partie non protégée (voir Figure 2.4). Le modèle prend également en compte la variation des coefficients de transmission, d'absorption et de réflexion du rayonnement solaire direct en fonction de l'angle d'incidence.

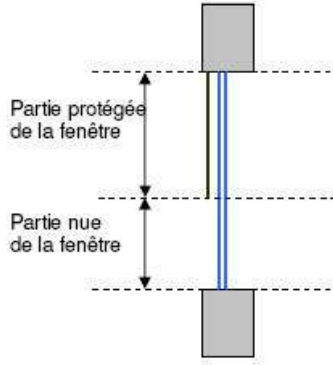


Figure 2.4 : Fenêtre avec protection solaire extérieure

La Figure 2.5 illustre la discrétisation nodale de la partie non protégée.

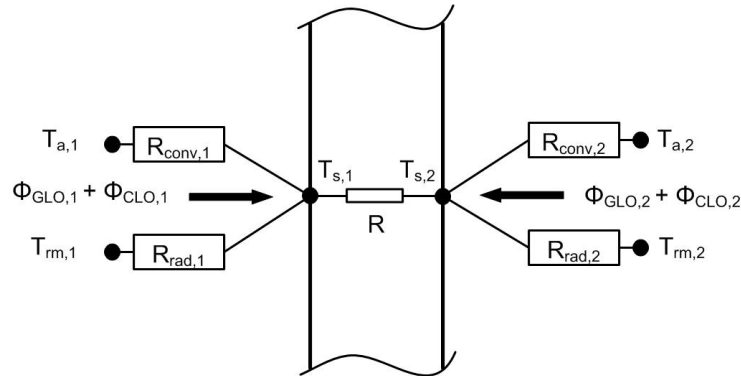


Figure 2.5 : Discrétisation nodale de la partie non protégée de la baie

En négligeant l'inertie thermique de la baie, le bilan thermique pour les deux nœuds de surface s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{1}{R}(T_{s,2} - T_{s,1}) + h_{conv,1}(T_{a,1} - T_{s,1}) + h_{rad,1}(T_{rm,1} - T_{s,1}) + \phi_{CLO,1} + \phi_{GLO,1} = 0 \\ \frac{1}{R}(T_{s,1} - T_{s,2}) + h_{conv,2}(T_{a,2} - T_{s,2}) + h_{rad,2}(T_{rm,2} - T_{s,2}) + \phi_{CLO,2} + \phi_{GLO,2} = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Sous forme matricielle, le bilan thermique des deux nœuds de surface s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R} + h_{conv,1} + h_{rad,1} & -\frac{1}{R} \\ -\frac{1}{R} & \frac{1}{R} + h_{conv,2} + h_{rad,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{s,1} \\ T_{s,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{conv,1} & 0 \\ 0 & h_{conv,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{a,1} \\ T_{a,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{rad,1} & 0 \\ 0 & h_{rad,2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{rm,1} \\ T_{rm,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_{GLO,1} + \phi_{CLO,1} \\ \phi_{GLO,2} + \phi_{CLO,2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Le calcul de la partie protégée est identique au cas précédent sauf au niveau du flux solaire absorbé, où l'absorptivité de la fenêtre est supposée concentrée sur la protection solaire.

La température moyenne de chacune des faces de la fenêtre est calculée par :

$$T_s = P_{lin} \times T_{s,protégée} + (1 - P_{lin}) \times T_{s,nue} \quad (2.13)$$

Où P_{lin} est la fraction protégée de la fenêtre.

2.2.2 Modélisation des masques proches

Le modèle de masques proches que nous avons intégré dans la bibliothèque SIMBAD permet d'étudier l'influence de ce type de protections solaires sur les performances énergétiques et le confort thermique d'un bâtiment.

Ce modèle est basé sur la réglementation thermique française (Réglementation Thermique, 2005) et permet de prendre en compte deux types de masques proches :

- Masques proches verticaux droite et gauche considérés comme infinis, caractérisés par leur débord et leur distance à la paroi étudiée.
- Masque proche horizontal considéré comme infini, caractérisé par son débord et sa distance à la paroi étudiée.

2.2.2.1 Masques proches verticaux

L'affaiblissement du rayonnement solaire diffus dus aux masques proches verticaux n'est pas pris en compte. On considère uniquement l'affaiblissement du rayonnement solaire direct (voir Figure 2.6).

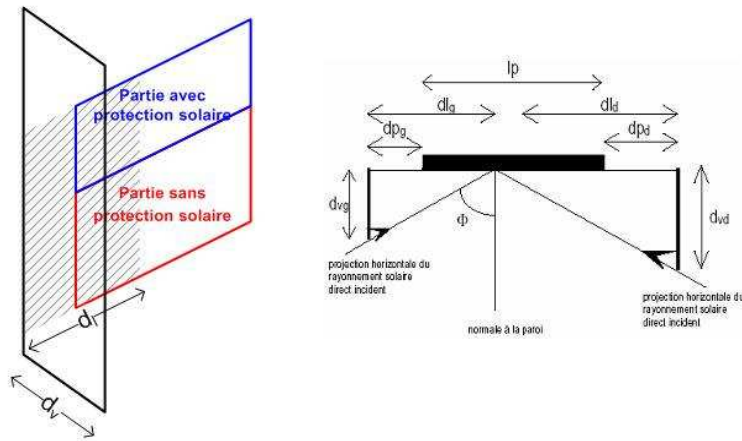


Figure 2.6 : Masques proches verticaux

Soit Φ l'angle azimutal défini comme suit :

$$\Phi = Az_{soleil} - Az_p \quad (2.14)$$

Les facteurs d'affaiblissement du rayonnement solaire direct f_{vg} et f_{vd} sont calculés comme suit :

$$\begin{cases} d_{lg} = \max\left(0 ; d_{vg} \times \tan(\phi)\right) \\ f_{vg} = \min\left[\max\left(0 ; 1 - \frac{d_{lg} - d_{pg}}{l_p}\right) ; 1\right] \\ d_{ld} = \max\left(0 ; -d_{vd} \times \tan(\phi)\right) \\ f_{vd} = \min\left[\max\left(0 ; 1 - \frac{d_{ld} - d_{pd}}{l_p}\right) ; 1\right] \end{cases} \quad (2.15)$$

Les facteurs d'affaiblissement sont les mêmes pour la partie de baie sans protection solaire et avec protection solaire.

2.2.2.2 Masque proche horizontal

Le modèle considère le masque jouxtant la paroi ou étant légèrement éloigné. Le facteur d'affaiblissement du rayonnement solaire direct f_h est calculé comme suit (voir Figure 2.7) :

$$\begin{cases} d_h = \max\left(0 ; d_{hm} \frac{\tan(\gamma)}{\cos(\phi)}\right) \\ f_{h1} = \min\left[\max\left(0 ; 1 - \frac{d_h - d_{hp}}{h_{p1}}\right) ; 1\right] \\ f_{h2} = \min\left[\max\left(0 ; 1 - \frac{d_h - (d_{hp} + h_{p1})}{h_{p2}}\right) ; 1\right] \end{cases} \quad (2.16)$$

γ représente la hauteur du soleil (angle entre le soleil et l'horizontal).

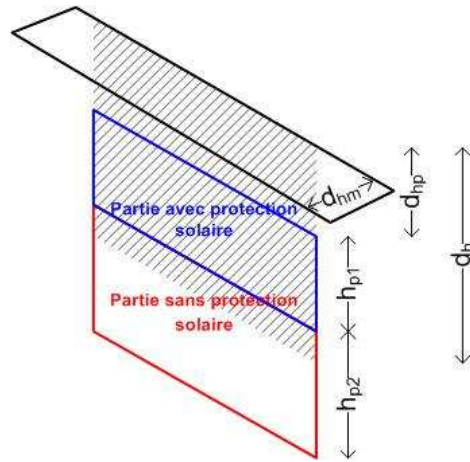


Figure 2.7 : Masque proche horizontal

Soit θ_{1g} et θ_{2g} les angles sous lesquels les point centraux de la partie protégée et non protégée voient le ciel (voir Figure 2.8).

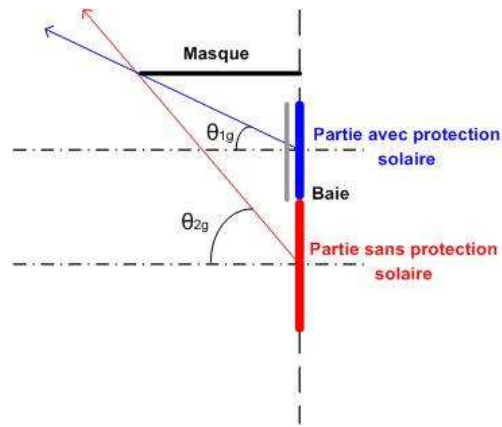


Figure 2.8 : Baie avec un masque horizontal

Les facteurs d'affaiblissement du rayonnement solaire diffus pour la partie protégée de la baie f_{diff1} , et pour la partie non protégée f_{diff2} , sont déterminés comme suit :

$$\begin{aligned} f_{diff1} &= \frac{\theta_{1g}}{90} \\ f_{diff2} &= \frac{\theta_{2g}}{90} \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.2.2.3 Rayonnement global incident

Pour la partie de la baie vitrée avec protection solaire, le rayonnement solaire global atteignant la baie s'écrit :

$$I_{sr1} = [(f_{vg} \times f_{vd} \times f_{h1}) \times I_D] + [f_{diff1} \times I_d] + I_r \quad (2.18)$$

Pour la partie de la baie vitrée sans protection solaire, le rayonnement solaire global atteignant la baie s'écrit :

$$I_{sr2} = [(f_{vg} \times f_{vd} \times f_{h2}) \times I_D] + [f_{diff2} \times I_d] + I_r \quad (2.19)$$

2.2.3 Modélisation des infiltrations d'air

L'objectif de ce modèle est de pouvoir prendre en compte l'influence de la perméabilité à l'air sur la performance énergétique d'un bâtiment. Ce modèle est fondé sur la norme (NF EN 15242, 2005). La méthode de calcul permet de déterminer de façon itérative le débit d'air dû à la perméabilité de l'enveloppe. Les calculs peuvent être conduits sur un bâtiment ou sur une zone du bâtiment pourvu que cette zone ait un système de ventilation propre et qu'elle soit indépendante du reste du bâtiment d'un point de vue aéraulique.

Le bilan de conservation de la masse pour une zone s'écrit :

$$\dot{m}_{extr} + \sum_c \dot{m}_c (P_{int,z}) = 0 \quad (2.20)$$

$\dot{m}_c$ est le débit massique d'air à travers un composant (défaut d'étanchéité, entrée d'air autoréglable)

Le débit volumique d'air traversant une entrée d'air est calculé à l'aide de l'équation suivante (NF E51-732, 2005) :

$$Q_{v, \text{entrée}}(\Delta P) = \begin{cases} 1,1 \cdot M \cdot \text{signe}(\Delta P) \cdot \sqrt{\frac{|\Delta P|}{20}} & ; \text{ Si } \Delta P \leq 20 \\ 0,55 \cdot M \cdot \frac{\Delta P}{80} + 77 \cdot \frac{M}{80} & ; \text{ Si } \Delta P \geq 20 \end{cases} \quad (2.21)$$

M est le module d'entrée d'air. Il correspond au débit d'air en m³/h pour une différence de pression de 20 Pa.

Le débit volumique d'air à travers les défauts d'étanchéité est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$Q_{v, \text{inf}}(\Delta P) = Q_{v, \text{inf}}(\Delta P_0) \cdot \text{signe}(\Delta P) \cdot \left| \frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right|^{2/3} \quad (2.22)$$

ΔP_0 est la différence de pression de référence qui est en général égale à 4 Pa

La différence de pression ΔP pour un composant prend en compte l'effet du vent et celui du tirage thermique:

$$\Delta P = \left(C_p \rho_{\text{ext}} \frac{v^2}{2} - \rho_{\text{ext}} g H_0 \right) - (P_{\text{int}, z} - \rho_{\text{int}} g H_z) \quad (2.23)$$

2.3 Modélisation des matériaux à changement de phase

Ce modèle permet de prendre en compte l'influence des matériaux à changement de phase (MCP) sur le confort thermique et les performances énergétiques d'un bâtiment.

Les matériaux à changement de phase sont caractérisés par des propriétés thermo-physiques variables en fonction de leur température. La Figure 2.9 montre la variation de la capacité calorifique d'un MCP de type paraffine (CSTB, 2004).

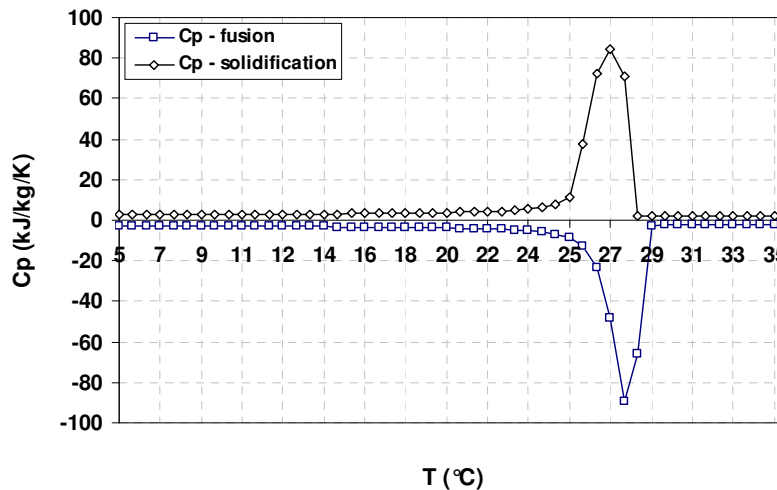


Figure 2.9 : Variation de la chaleur spécifique de la paraffine en fonction de la température

Il s'agit d'une modélisation de type RC (analogie électrique) caractérisant de façon dynamique le comportement d'une paroi contenant des MCP. Ce modèle est semblable au modèle de parois opaques du modèle de bâtiment décrit précédemment (voir §2.2.1.2). Les nœuds de température de la couche de MCP ont des propriétés thermo-physiques variables en fonction de leur température (Ahmad et al, 2006).

Le bilan thermique d'un nœud de MCP i est exprimé à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho(T_i^{(t-\Delta t)}) \cdot C_p(T_i^{(t-\Delta t)}) \cdot \Delta x \cdot \frac{dT_i^{(t)}}{dt} = \frac{\lambda(T_i^{(t-\Delta t)})}{\Delta x} \cdot (T_{i-1}^{(t-\Delta t)} - T_i^{(t-\Delta t)}) + \frac{\lambda(T_i^{(t-\Delta t)})}{\Delta x} \cdot (T_{i+1}^{(t-\Delta t)} - T_i^{(t-\Delta t)}) \quad (2.24)$$

En regroupant les équations du bilan thermique de tous les nœuds de température des parois, on obtient le système matriciel suivant :

$$\frac{d[T]}{dt} = \frac{[T]^{(t)} - [T]^{(t-\Delta t)}}{\Delta t} = [A]^{(t-\Delta t)} \cdot [T]^{(t-\Delta t)} + [B]^{(t-\Delta t)} \cdot [U]^{(t-\Delta t)} \quad (2.25)$$

Ce type de modélisation de parois avec MCP présente des résultats en adéquation avec les mesures expérimentales (Ahmad et al 2006, CSTB 2004).

2.4 Modélisation des échangeurs géothermiques

La modélisation concerne deux types d'échangeurs géothermiques :

- Echangeur air-sol, appelé souvent puits climatique, puits canadien ou puits provençal. Un échangeur air-sol consiste en un ensemble de tube ou éventuellement un tube unique, enterré(s) dans le sol et intégré(s) au système de ventilation. Le but du système est d'amortir l'oscillation météo journalière ou saisonnière portée par l'air, en tirant parti de l'inertie thermique du sol. En pratique, cette technique peut être utilisée tant pour le préchauffage hivernal du renouvellement d'air que pour son rafraîchissement estival.
- Echangeur eau-sol horizontal, appelé souvent capteur géothermique horizontal. Il s'agit de tubes enterrés horizontalement afin de puiser de l'énergie dans le sol, grâce à de l'eau glycolée ou du fluide frigorigène de la pompe à chaleur selon la technologie employée.

Deux modèles ont été implémentés dans SIMBAD :

- Modèle stationnaire : il s'agit d'un modèle prenant en compte les échanges convectifs entre le fluide caloporteur et le tube enterré ainsi que le transfert de chaleur par conduction à travers le tube et le sol. Le calcul s'effectue en régime permanent. Le transfert de chaleur dans le sol est considéré comme étant unidimensionnel.
- Modèle dynamique : ce modèle prend en compte également les échanges convectifs entre le fluide caloporteur et le tube enterré ainsi que le transfert de chaleur par conduction à travers le tube et le sol. Le calcul s'effectue en régime transitoire. Le transfert de chaleur dans le sol est considéré comme étant bidimensionnel.

2.4.1 Modélisation de la température du sol

L'évolution de la température du sol en fonction de la profondeur, se calcule en considérant la réponse dans le temps aux variations de la température de surface.

En supposant que la température de surface est égale à la température de l'air extérieur, les variations annuelles de cette température peuvent être exprimées à l'aide d'une fonction périodique écrite sous forme sinusoïdale :

$$T_s(J) = T_{\text{moy}} - T_{\text{amp}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}(J - J_0)\right) \quad (2.26)$$

Il est également possible d'exprimer la variation journalière de cette température sous forme sinusoïdale. Dans ce cas, les variables de temps (J , J_0 et T) sont exprimées en heures, minutes ou secondes.

Sur la Figure 2.10, nous avons porté pour la ville de Nancy, le profile de variation annuelle de la température moyenne mensuelle de surface, calculée à l'aide de l'équation (2.26) et celui obtenu à partir des données météo, en supposant que la température de surface est égale à la température de l'air extérieur. Les données météo sont issues de la réglementation thermique RT2005.

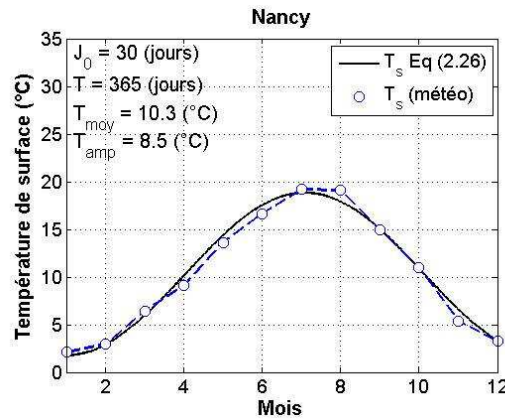


Figure 2.10 : Variation annuelle de la température de surface à Nancy

On peut constater que l'équation (2.26) permet d'obtenir une bonne appréciation de la variation annuelle de la température de surface.

La réponse à une sollicitation périodique en température, à une profondeur z , est déterminée à l'aide de la théorie de la diffusion de chaleur par conduction dans un milieu solide semi infini (Hagentoft, 2001) :

$$T(z, J) = T_{\text{moy}} - T_{\text{amp}} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a_{\text{sol}} T}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}(J - J_0) - z \sqrt{\frac{\pi}{a_{\text{sol}} T}}\right) \quad (2.27)$$

Cette relation permet de montrer plusieurs caractéristiques importantes de l'évolution de la température en profondeur :

- la moyenne de la température et sa période restent inchangées en profondeur,
- l'amplitude de la variation de température diminue de manière exponentielle avec la profondeur, cette décroissance est d'autant plus rapide que la période est plus petite,
- le déphasage augmente avec la profondeur.

La Figure 2.11 montre la décroissance de l'amplitude des variations de température en profondeur ($\Delta T_{\text{profondeur}}$) rapportée à l'amplitude en surface ($\Delta T_{\text{surface}}$) pour une variation de température annuelle et journalière dans le cas d'un sol en gravier et d'un sol en argile (voir Tableau 2.1).

Sol	λ (W/m ² K)	C_p (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
Argile	1,5	2085	1500
Gravier	2,0	1045	1950

Tableau 2.1 : Caractéristiques thermo-physiques de l'argile et du gravier

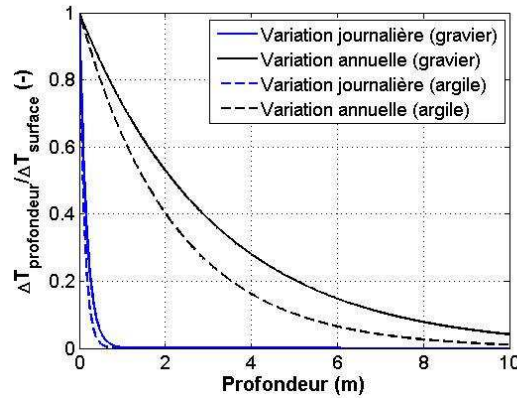


Figure 2.11 : Amplitude relative des variations de température en fonction de la profondeur pour un cycle annuel et journalier

On constate que l'amplitude journalière devient négligeable pour des profondeurs supérieures à 0,3 m et que l'amplitude annuelle reste significative jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 5 m.

Nous négligeons pour la suite les variations journalières dont l'influence ne concerne que des profondeurs de l'ordre de 50 cm. Le cycle de température est représenté par une période annuelle (Kusuda et Archenbach 1965, Labs et Cook 1989) :

$$T(z, J) = T_{\text{mean}} - T_{\text{amp}} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365 \times a_{\text{sol}}}}} \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[J - J_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \times a_{\text{sol}}}} \right] \right\} \quad (2.28)$$

Cette équation présente des différences inférieures à $\pm 1^\circ\text{C}$ par rapport aux données expérimentales (Labs et Cook 1989, Al-Ajmi et al 2002).

La Figure 2.12 montre la variation en fonction de la profondeur du déphasage de la température du sol par rapport à la variation annuelle de la température de surface, pour un sol en gravier et un sol en argile.

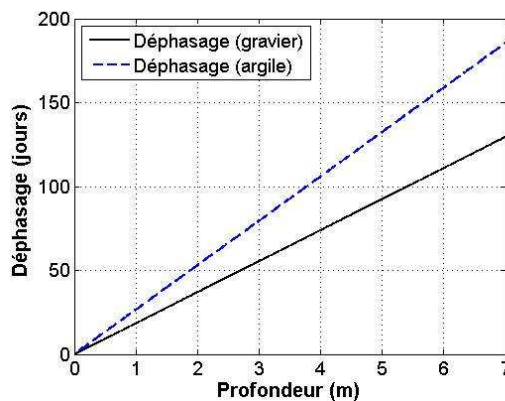


Figure 2.12 : Déphasage des variations de température en fonction de la profondeur

La Figure 2.13 montre la variation annuelle de la température du sol en fonction de la profondeur pour la ville de Nancy, calculée à l'aide de l'équation (2.28).

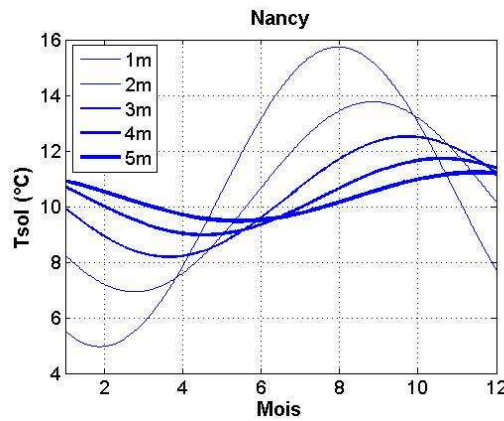


Figure 2.13 : Variation annuelle de la température du sol en fonction de la profondeur pour un sol en argile pour Nancy

2.4.2 Modèle stationnaire continu

De nombreux modèles d'échangeur géothermiques sont disponibles dans la littérature. A titre d'exemple, Tzaferis et al (1992) a étudié huit modèles de puits climatique qu'il a regroupés dans deux familles :

- Les modèles prenant en compte les échanges convectifs entre l'air et le tube enterré ainsi que le transfert de chaleur à travers le sol.
- Les modèles supposant que le sol n'est pas perturbé par le flux d'air traversant le tube enterré. Seuls les échanges convectifs entre l'air et le tube sont pris en compte.

Six de ces modèles sont stationnaires monodimensionnels. Tzaferis et al (1992) a conclu que les différents modèles aboutissent à des résultats semblables. Les résultats obtenus par les huit modèles sont en concordance avec les données expérimentales. Il a été conclu qu'une approche stationnaire monodimensionnelle permet de bien représenter le comportement thermique d'un puits climatique.

Des modèles plus détaillés sont également disponibles, tels que ceux développés par Mihalakakou et al (1994), Bojic et al (1997), Gauthier et al (1997) et Hollmuller et al (2001). Il s'agit de modèles dynamiques 2D ou 3D prenant en compte l'influence de l'humidité du sol et les échanges latents entre l'air et le tube. Cependant ces modèles sont beaucoup plus complexes et augmentent considérablement le temps de simulation.

Le modèle stationnaire continu que nous avons intégré dans SIMBAD a été développé par Al-Ajmi et al (2006) pour modéliser un échangeur air-sol. Il a été validé par rapport à deux études expérimentales (Dhaliwal et Goswami (1984), Shingari (1995)) et à un autre modèle (Mihalakakou et al, 1995).

Ce modèle prend en compte les échanges convectifs entre le fluide caloporteur et le tube enterré ainsi que le transfert de chaleur par conduction dans le tube et dans le sol. Le sol est considéré comme un milieu homogène. Ainsi ne sont pas prises en compte les variations de la diffusivité thermique dues aux variations de la teneur en eau du sol. Ne sont pas également pris en compte d'éventuels mouvements d'eau entraînant des échanges convectifs à l'intérieur du terrain.

Considérons un fluide qui traverse un tube cylindrique entouré d'une couche de sol d'épaisseur finie (voir Figure 2.14).

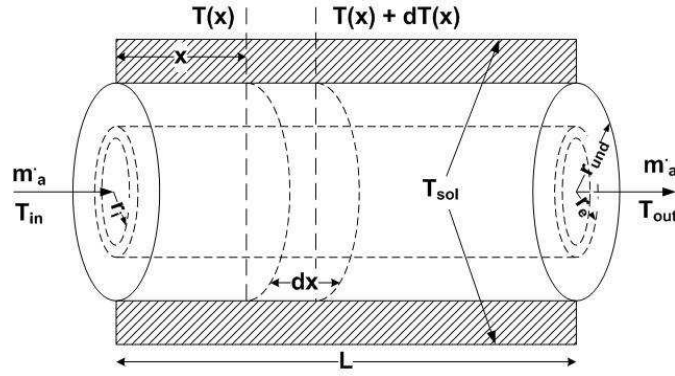


Figure 2.14 : Coupe longitudinale du tube enterré

Soit un élément du tube de longueur dx . Son bilan thermique s'écrit :

$$\dot{m}_a \cdot C_{p_a} \cdot dT_{(x)} = \frac{dx}{R_{\text{conv}} + R_{\text{tube}} + R_{\text{sol}}} (T_{\text{sol}} - T_{(x)}) \quad (2.29)$$

Les résistances thermiques sont calculées comme suit:

$$\begin{cases} R_{\text{conv}} = \frac{1}{2\pi r_i h_{\text{conv}}} \\ R_{\text{tube}} = \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{tube}}} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \\ R_{\text{sol}} = \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{sol}}} \ln\left(\frac{r_{\text{und}}}{r_e}\right) \end{cases} \quad (2.30)$$

Le coefficient d'échange convectif est calculé à l'aide du nombre de Nusselt :

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{D_{\text{tube}}} \quad (2.31)$$

Le nombre de Nusselt est évalué grâce à une corrélation exprimée en fonction du nombre de Prandtl Pr et du nombre de Reynolds Re :

- Si l'air est le fluide caloporteur, la corrélation utilisée est (Gnielinski, 1976) :

$$\begin{cases} \text{Nu} = \frac{(\xi/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\xi/8}(Pr^{2/3}-1)} \\ \text{Pour } 0,5 \leq Pr \leq 2000 \text{ et } 2300 \leq Re \leq 5.10^6 \end{cases} \quad (2.32)$$

ξ est le coefficient de perte de charge calculé par (Paepe et Janssens 2003) :

$$\xi = (0,79 \times \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (2.33)$$

- Si l'eau est le fluide caloporteur, on utilise la relation de Colburn :

$$\begin{cases} \text{Nu} = 0.023 \times \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \\ \text{Pour } 0,6 \leq \text{Pr} \leq 160, \text{Re} \geq 10^4, \frac{L}{2r_i} > 60 \end{cases} \quad (2.34)$$

ξ est le coefficient de perte de charge calculé par (Paepe et Janssens 2003) :

$$\begin{cases} \xi = \frac{64}{\text{Re}}, \text{ si } \text{Re} < 2300 \\ \xi = 0.316 \times \text{Re}^{-0.25}, \text{ si } \text{Re} \geq 2300 \end{cases} \quad (2.35)$$

La résistance thermique totale entre le fluide et le sol s'écrit :

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{conv}} + R_{\text{tube}} + R_{\text{sol}} \quad (2.36)$$

Le coefficient de transfert global entre le fluide et le sol, exprimé en W/mK, s'écrit :

$$U_g = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (2.37)$$

Après intégration de l'équation (2.29) suivant x , il vient :

$$T_{(x)} = T_{\text{sol}} + (T_{\text{in}} - T_{\text{sol}}) \cdot e^{\frac{-U_g}{m_a \cdot C_{p_a}} x} \quad (2.38)$$

Pour un tube enterré de longueur L , la température du fluide à la sortie du tube s'exprime par :

$$T_{\text{out}} = T_{\text{sol}} + (T_{\text{in}} - T_{\text{sol}}) \cdot e^{\frac{-U_g \cdot L}{m_a \cdot C_{p_a}}} \quad (2.39)$$

T_{in} est la température du fluide à l'entrée du tube enterré. L'efficacité de l'échangeur est alors définie par :

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}{T_{\text{sol}} - T_{\text{in}}} = 1 - e^{\frac{-U_g \cdot L}{m_a \cdot C_{p_a}}} \quad (2.40)$$

La température du fluide à la sortie du puits climatique peut ainsi être exprimée en fonction de sa température à l'entrée, la température du sol non perturbé et l'efficacité de l'échangeur :

$$T_{\text{out}} = T_{\text{in}} + \varepsilon \cdot (T_{\text{sol}} - T_{\text{in}}) \quad (2.41)$$

2.4.3 Modèle dynamique nodal

Le modèle dynamique est basé sur le modèle Type556 de TRNSYS (TRNSYS 16, 2005) issu des travaux de Giardina (1995) qui l'a développé pour étudier des échangeurs eau/sol horizontaux.

Il s'agit d'un modèle dynamique qui prend en compte les échanges convectifs entre le fluide caloporteur et le tube enterré ainsi que le transfert de chaleur par conduction dans le tube et dans le sol.

La Figure 2.15 montre une vue du tube enterré entouré d'une couche de terrain d'épaisseur finie. Par symétrie, le calcul s'effectue uniquement pour la moitié du cylindre de sol.

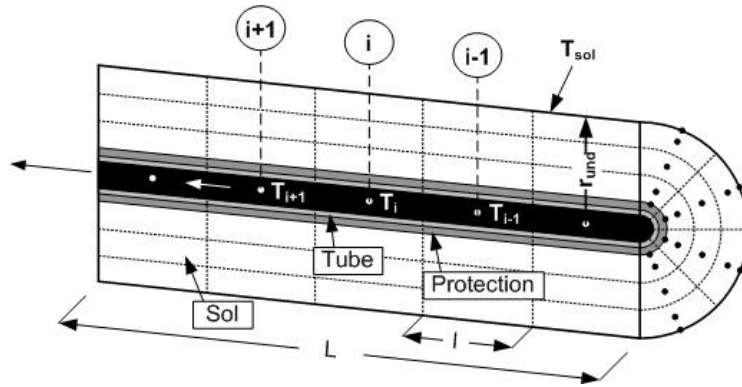


Figure 2.15 : Modélisation nodale du tube enterré et du sol

La couche externe du volume cylindrique de sol est supposée non perturbée par le fluide caloporteur. Sa température correspond à la température du sol non perturbé, calculée précédemment (voir l'équation (2.28)).

Le sol est divisé en quatre sous volumes selon la direction du débit de fluide. Le transfert de chaleur dans chaque sous volume est considéré comme étant bidimensionnel (voir Figure 2.16). Le calcul est réalisé à l'aide de l'analogie électrique (réseau RC).

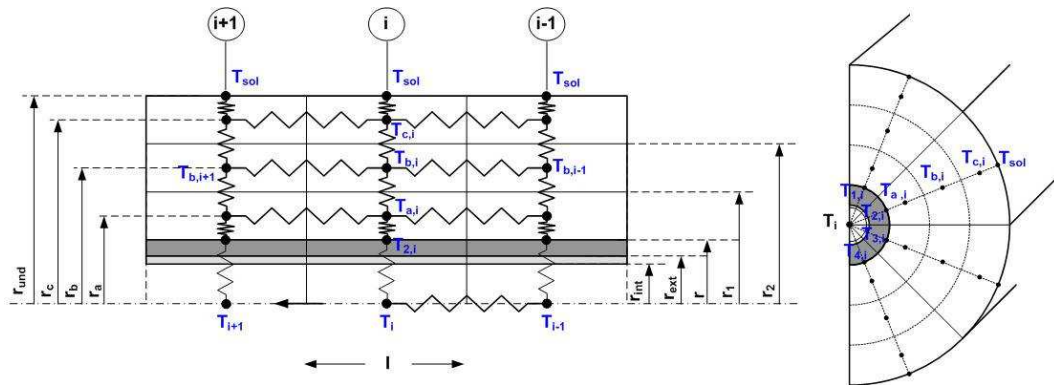


Figure 2.16 : Réseau RC pour le calcul des échanges thermiques

Le bilan thermique pour un nœud de température dans le sol s'écrit :

$$mC_{p_{sol}} \frac{dT_{b,i}}{dt} = \frac{(T_{a,i} - T_{b,i})}{R_{ab}} + \frac{(T_{c,i} - T_{b,i})}{R_{bc}} + \frac{(T_{b,i-1} - T_{b,i})}{R_{bb}} + \frac{(T_{b,i+1} - T_{b,i})}{R_{bb}} \quad (2.42)$$

Les termes R_{ab} , R_{bc} et R_{bb} représentent des résistances thermiques, calculées selon les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{bb} = \frac{l}{\lambda_{sol} \frac{\pi}{8} (r_2^2 - r_1^2)} \\ R_{ab} = \frac{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)}{\lambda_{sol} \left(\frac{\pi \times l}{4}\right)} \\ R_{bc} = \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_b}\right)}{\lambda_{sol} \left(\frac{\pi \times l}{4}\right)} \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Le terme m représente la masse d'un volume de sol, calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$m = \rho_{sol} \frac{\pi}{8} (r_2^2 - r_1^2) \times l \quad (2.44)$$

Le bilan thermique pour le volume de fluide de longueur l , à la température T_{fi} s'écrit :

$$m_f C_{pf} \frac{dT_i}{dt} = m_f \times C_{pf} \times (T_{i-1} - T_i) + \frac{(T_i - \text{moy}(T))}{R_{conv} + R_{tube} + R_{prot}} \quad (2.45)$$

Avec :

- m_f est la masse du volume de fluide :

$$m_f = \rho_f \times \pi \times r_{int}^2 \times l \quad (2.46)$$

- $\text{moy}(T)$ est la température moyenne de la couche externe de la protection :

$$\text{moy}(T) = \frac{T_{1,i} + T_{2,i} + T_{3,i} + T_{4,i}}{4} \quad (2.47)$$

Les résistances thermiques sont calculées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} \times 2\pi r_{int} \times l} \\ R_{tube} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{\lambda_{tube} \times 2\pi \times l} \\ R_{prot} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_{ext}}\right)}{\lambda_{prot} \times 2\pi \times l} \end{array} \right. \quad (2.48)$$

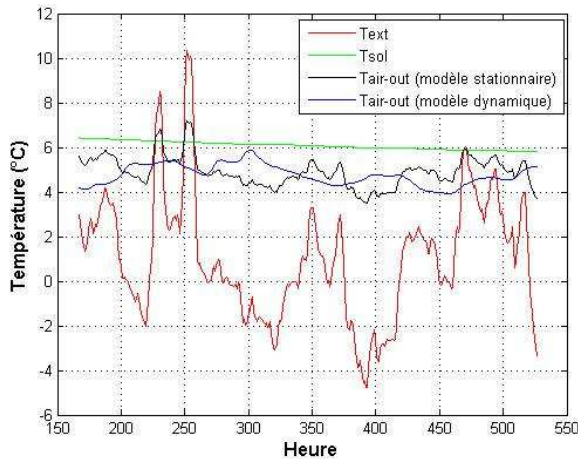
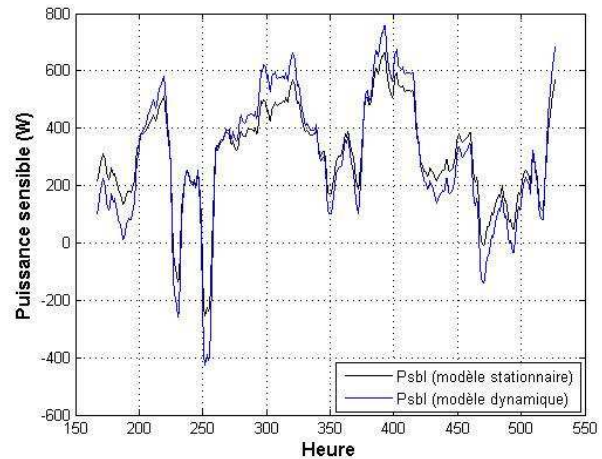
2.4.4 Comparaisons et validations

Le Tableau 2.2 donne les paramètres utilisés pour la comparaison des deux modèles, stationnaire et dynamique. L'air est le fluide caloporteur.

Longueur du tube	40 m
Profondeur du tube	1,8 m
Diamètre intérieure	0,16 m
Diamètre de la couche de sol perturbé	1 m
Type de sol	Argile
Données météo	Nancy

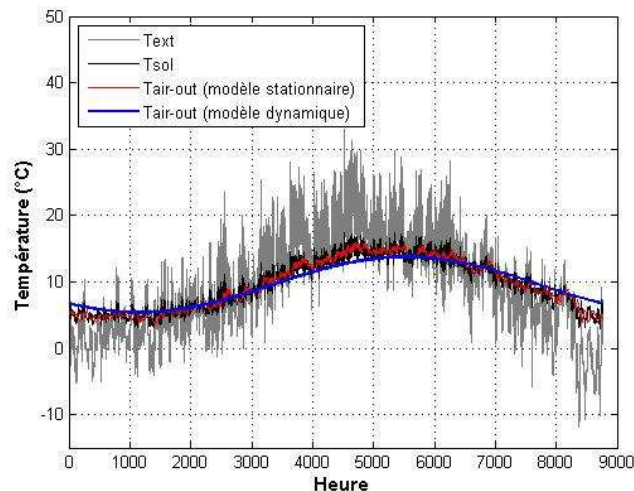
Tableau 2.2 : Données pour la comparaison entre les modèles stationnaire et dynamique

Les Figure 2.17 et Figure 2.18 montrent la température de l'air à la sortie du tube enterré et la puissance sensible échangée entre l'air et le sol, obtenues par les deux modèles pour une période de 10 jours.


Figure 2.17 : Température de l'air à la sortie du puits climatique pour 10 jours

Figure 2.18 : Puissance sensible échangée entre l'air et le sol pour 10 jours

Suite à la prise en compte de l'inertie du sol entourant le tube enterré dans le modèle dynamique, on retrouve un déphasage entre la température de l'air à la sortie du tube et sa température à l'entrée. Ce phénomène n'apparaît pas dans le modèle stationnaire.

La Figure 2.19 montre la variation de la température de l'air à la sortie de l'échangeur sur une année calculée par les deux modèles.


Figure 2.19 : Température de l'air à la sortie de l'échangeur air-sol pour une année

Le Tableau 2.3 donne l'énergie sensible totale annuelle échangée entre l'air et le sol pour le préchauffage et le rafraîchissement, calculée par les deux modèles.

Modèle	Stationnaire	Dynamique	Ecart relatif (%)
Energie sensible – chauffage (kWh/an)	1244	1400	11,1
Energie sensible – rafraîchissement (kWh/an)	1243	1397	11,0

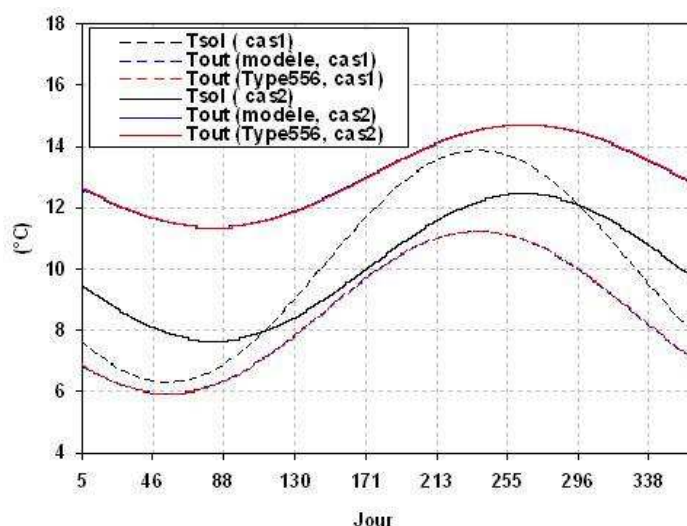
Tableau 2.3 : Energies calculées par les deux modèles de capteurs enterrés horizontaux

Par ailleurs, le modèle dynamique a été comparé au Type 556 de TRNSYS (TRNSYS 16, 2005). Deux cas de comparaison ont été définis (voir Tableau 2.4). L'eau est considérée comme fluide caloporteur.

	Cas 1	Cas 2
Sol	Argile	Gravier
Longueur du tube	100 m	100 m
Diamètre intérieur	2 cm	4 cm
Épaisseur du tube	3 mm	3 mm
Protection	-	-
Profondeur du tube	1,5 m	2,5 m
R_{sol}	0,5 m	1 m
Débit d'eau	0,1 kg/s	0,5 kg/s
Température d'eau à l'entrée	5 °C	20 °C

Tableau 2.4 : données pour la comparaison entre le modèle dynamique et le Type 556 de TRNSYS

La Figure 2.20 montre une comparaison entre la température d'eau à la sortie du tube enterré obtenue par le modèle développé et le Type 556. On peut constater une très bonne cohérence entre les résultats obtenus par les deux modèles.

**Figure 2.20 : Comparaison entre le modèle dynamique et le Type 556 de TRNSYS**

2.5 Le modèle d'échangeur à plaques air-air

Le système de ventilation double flux avec récupération de chaleur est un système de ventilation mécanique, utilisant un échangeur de chaleur pour préchauffer l'air neuf extérieur en récupérant une partie de la chaleur de l'air extrait, permettant ainsi de réaliser des économies d'énergie. L'échangeur de chaleur consiste souvent en un échangeur à plaque à contre courants ou à courants croisés.

Le modèle d'échangeur à plaques que nous avons intégré dans la bibliothèque SIMBAD est fondé sur la méthode NUT- ϵ (Brandemuhel et al 1993). Cette méthode permet de déterminer les états de sortie d'un échangeur de chaleur pour six différentes configurations d'échangeurs :

- contre-courants
- courants parallèles
- courants croisés, deux fluides non brassés

- courants croisés, deux fluides brassés
- courants croisés, fluide 1 brassé, fluide 2 non brassé
- courants croisés, fluide 2 brassé, fluide 1 non brassé

L'efficacité de l'échangeur est définie comme le ratio entre l'échange de chaleur effectif et l'échange maximum possible pour des conditions d'entrée et de débit données.

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \\ q = C_{p_a} \cdot \dot{m}_{ae} \cdot (T_{ae,in} - T_{ae,out}) = C_{p_a} \cdot \dot{m}_{an} \cdot (T_{an,out} - T_{an,in}) \\ q_{\max} = C_{\min} \cdot (T_{ae,in} - T_{an,in}) \\ C_{\min} = \min(C_{p_a} \dot{m}_{ae}, C_{p_a} \dot{m}_{an}) \end{cases} \quad (2.49)$$

L'efficacité peut s'exprimer en fonction des caractéristiques physiques de l'échangeur, des chaleurs spécifiques des fluides utilisés ainsi que de la configuration de l'échangeur. Pour une configuration donnée, l'efficacité peut s'exprimer en fonction de deux variables sans dimension définies par :

$$\begin{cases} NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \\ C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \end{cases} \quad (2.50)$$

UA étant le coefficient d'échange global exprimé en W/K.

La méthode NUT- ε est typiquement utilisée pour l'analyse des échanges de chaleur sans échange de masse. Pour ce type de transfert de chaleur, la température du fluide est la variable d'état et la capacité du fluide est le produit du débit et de la chaleur spécifique.

Pour les différentes configurations citées précédemment, les efficacités de l'échangeur s'expriment par :

- Echangeur à contre courants :

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{1 - e^{-NUT(1-C)}}{1 - C \cdot e^{-NUT(1-C)}}, C \neq 1 \\ \frac{NUT}{NUT + 1}, C = 1 \end{cases} \quad (2.51)$$

- Echangeur à courants croisés avec les deux fluides non brassés :

$$\begin{cases} \varepsilon = 1 - \exp\left(\frac{e^{-NUT \cdot C \cdot n} - 1}{C \cdot n}\right) \\ n = NUT^{-0,22} \end{cases} \quad (2.52)$$

- Pour une configuration à courants croisés avec les deux fluides brassés :

$$\varepsilon = \left[\frac{1}{1 - e^{-NUT}} + \frac{C}{1 - e^{-NUT \cdot C}} - \frac{1}{NUT} \right]^{-1} \quad (2.53)$$

- Pour une configuration à courants croisés avec le fluide de capacité minimale non brassé :

$$\varepsilon = \frac{(1 - e^{-C(1 - e^{-NUT})})}{C} \quad (2.54)$$

- Echangeur à courants croisés avec le fluide de capacité maximale non brassé :

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{1 - e^{-NUT \cdot C}}{C}} \quad (2.55)$$

Les températures de sortie s'expriment par:

$$\begin{aligned} T_{ae,out} &= T_{ae,in} - \frac{\varepsilon \cdot q_{max}}{Cp_a \cdot \dot{m}_{ae}} \\ T_{an,out} &= T_{an,in} + \frac{\varepsilon \cdot q_{max}}{Cp_a \cdot \dot{m}_{an}} \end{aligned} \quad (2.56)$$

2.6 Le modèle de pompe à chaleur

Il s'agit d'un modèle polynômial qui permet d'évaluer les performances (puissance calorifique/frigorifique, COP/EER) d'une pompe à chaleur réversible à partir des températures des sources froide et chaude (Morisot et al 2002a, Morisot et al 2002b). Ce modèle nécessite d'être paramétré par des données (puissance calorifique/frigorifique et COP/EER) qui sont le plus souvent issues des catalogues des constructeurs. Bien entendu, ce modèle donne des résultats en adéquation avec les données constructeurs mais également avec les résultats obtenus par des modèles plus détaillés (Alessandrini et al 2002). Il peut être utilisé dans le cas d'une pompe à chaleur sur l'air extérieur ou couplé à une sonde géothermique.

2.6.1 Modélisation du fonctionnement en mode refroidissement

Modélisation à pleine charge : La modélisation du fonctionnement à pleine charge est basée sur deux équations. L'une pour l'efficacité en mode froid de la PAC (EER) l'autre pour la puissance frigorifique. Les équations retenues sont les suivantes :

$$\begin{cases} P_{fl} = (1 + D_1(T_{ec} - T_{ec,nom}) + D_2(T_{se} - T_{se,nom})) \\ EER_{fl} = EER_{nom} \cdot (1 + C_1\Delta t + C_2\Delta t^2) \end{cases} \quad (2.57)$$

Où :

$$\Delta t = \left(\frac{T_{ec} + 273,15}{T_{se} + 273,15} \right) - \left(\frac{T_{ec} + 273,15}{T_{se} + 273,15} \right)_{nom} \quad (2.58)$$

Les coefficients de régression C_i et D_i sont déterminés à partir de 3 points de fonctionnement soigneusement choisis (Stabat et al 2002).

Modélisation à charge partielle : La régulation de la PAC est supposée parfaite, c'est à dire que la puissance thermique fournie est égale à la puissance requise. Dans ce cas, la puissance électrique absorbée par la PAC est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$P_a = P_{afl} \left[C_{cp} \frac{P_f}{P_{f\,fl}} + (1 - C_{cp}) \cdot \left(\frac{P_f}{P_{f\,fl}} \right)^2 \right] \quad (2.59)$$

Le coefficient C_{cp} permet de prendre en compte soit une amélioration, soit une dégradation de la performance de la PAC à charge partielle, cependant, en règle générale la valeur de ce coefficient est proche de 1 (Morisot et Marchio 2002).

2.6.2 Modélisation du fonctionnement en mode chauffage

Modélisation à pleine charge : La modélisation du fonctionnement à pleine charge est basée sur deux équations semblables à celles du fonctionnement en mode froid :

$$\begin{cases} P_{c\,fl} = (1 + D_1(T_{ee} - T_{ee,nom}) + D_2(T_{sc} - T_{sc,nom})) \\ COP_{fl} = COP_{nom} \cdot (1 + C_1\Delta t + C_2\Delta t^2) \end{cases} \quad (2.60)$$

Où :

$$\Delta t = \left(\frac{T_{ee} + 273,15}{T_{sc} + 273,15} \right) - \left(\frac{T_{ee} + 273,15}{T_{sc} + 273,15} \right)_{nom} \quad (2.61)$$

Les coefficients de régression C_i et D_i sont également déterminés à partir de 3 points de fonctionnement soigneusement choisis (Roujol et Marchio 2002).

Un facteur de correction, noté C_d , est appliqué à la puissance calorifique. Ce facteur prend en compte la diminution de la performance de la PAC due au givrage sur la batterie et à l'influence des cycles de dégivrage. La valeur du coefficient C_d est souvent disponible dans les catalogues des constructeurs. En général, le givrage de l'évaporateur apparaît et devient important lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à 2°C pour des conditions usuelles d'humidité. Par défaut, l'ordre de grandeur du coefficient C_d est de 0.9 (Roujol et Marchio 2002). La puissance calorifique réelle fournie par la PAC s'écrit alors :

$$P_{c\,réelle} = C_d \cdot P_{c\,fl} \quad (2.62)$$

Modélisation à charge partielle : La modélisation à charge partielle est basée sur l'hypothèse d'une régulation parfaite de la machine. La puissance électrique absorbée par la pompe à chaleur à charge partielle est déterminée par :

$$P_a = P_{afl} \left[C_{cp} \frac{P_c}{P_{c\,fl}} + (1 - C_{cp}) \cdot \left(\frac{P_c}{P_{c\,fl}} \right)^2 \right] \quad (2.63)$$

Le coefficient C_{cp} prend également en compte soit une amélioration, soit une dégradation de la performance de la PAC à charge partielle (Morisot et Marchio 2002).

2.7 Exemples d'applications

Les modèles présentés précédemment ont contribué au développement de la bibliothèque SIMBAD, en permettant d'analyser de nouvelles solutions techniques visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Ces modèles ont été utilisés pour mener à bien des études de recherche et de développement dans le cadre des bâtiments à basse consommation d'énergie. Parmi ces études, nous pouvons citer :

- Rafraîchissement passif des bâtiments tertiaires à l'aide de matériaux à changement de phase (Chlela et al, 2007a).
- Evaluation numérique des performances énergétiques des systèmes de ventilation mécanique avec récupération de chaleur (Chlela et al, 2007b).
- Amélioration de l'efficacité énergétique d'une maison individuelle (Chlela et al, 2006)
- Evaluation des performances énergétiques et du confort thermique d'été des maisons à ossature bois (Chiche, 2006).
- Modélisation des systèmes compacts pour le chauffage, la production de l'ECS, le refroidissement et la ventilation des maisons passives (Boyer, 2007).

Nous allons présenter par la suite des résultats issus des trois premières études.

2.7.1 Rafraîchissement passif à l'aide de matériaux à changement de phase

Cette étude a été élaborée dans le cadre d'un projet financé par l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) portant sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) en climatisation passive d'été et chauffage d'intersaison. Elle vise à analyser l'impact de deux types de MCP sur le confort thermique d'été d'un bureau, par le biais de la simulation dynamique. L'analyse a été réalisée en considérant le climat de quatre villes françaises : Trappes, Mâcon, Carpentras et Nice.

L'un des MCP est un acide gras dont la fusion s'effectue entre 22 et 26°C et la solidification entre 19 et 22°C (voir Tableau 2.5 et Figure 2.21).

	ρ (kg/m ³)		λ (W/mK)	
	Solide	Liquide	Solide	Liquide
Acide gras	960	884	0,18	0,18

Tableau 2.5 : Caractéristiques du matériau à changement de phase

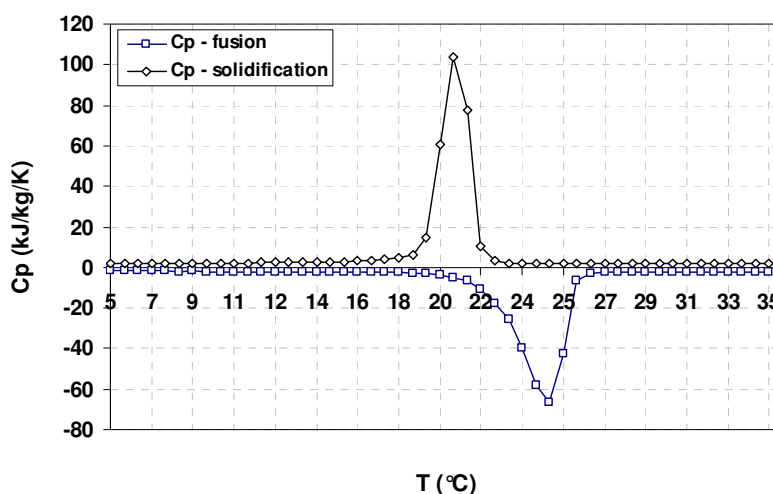


Figure 2.21 : Variation de la chaleur spécifique de l'acide gras en fonction de la température

Le local retenu dans cette étude (voir Figure 2.22) est un bureau qui présente à la fois des apports internes importants, une occupation intermittente et une inertie légère. Il possède deux parois déperditives en contact avec l'extérieur : une toiture et une façade orientée à l'ouest qui possède une fenêtre de 5 m² (voir Tableau 2.6). Les autres façades sont supposées adiabatiques et constituées de parois légères en plâtre. La fenêtre est un double vitrage clair équipé d'une protection solaire extérieure mobile. Elle est coulissante et seule la moitié peut s'ouvrir pour ventiler la pièce (voir Tableau 2.7).

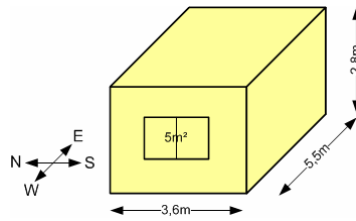


Figure 2.22 : Vue du bureau étudié

		Epaisseur	ρ (Kg/m ³)	Cp (J/kgK)	λ (W/mK)
Plafond	Isolant	0,04	50	850	0,04
	Béton	0,18	2400	850	2,1
	Isolant	0,1	30	837	0,025
	Étanchéité	0,02	1050	920	0,25
Mur ouest	Plâtre	0,012	900	850	0,21
	Laine de verre	0,1	30	850	0,04
	maçonnerie	0,175	1600	850	0,79

Tableau 2.6 : Caractéristiques thermiques des parois déperditives du bureau

	U (W/m ² K)	τ (-)	α (-)
Sans protection solaire	2,7	0,7	0,1
Avec protection solaire	2,2	0,15	0,3

Tableau 2.7 : Caractéristiques thermiques de la paroi vitrée

Le bureau est occupé par deux personnes de 7h à 19h qui travaillent sur des postes informatiques. En période d'occupation, les apports internes sont les suivants :

- Les apports internes sensibles dus aux occupants sont de 164 W. A cette valeur, on applique un facteur de correction de 0,8 qui prend en compte une absence partielle des occupants.
- Deux ordinateurs et deux écrans dont la puissance totale est de 114 W.
- Éclairage artificiel de 12 W/m² de puissance.

Les protections solaires sont mises en place en fonction de l'intensité lumineuse sur la vitre extérieure suivant une régression établie pour la nouvelle réglementation thermique (Réglementation Thermique, 2005). Les protections solaires sont entièrement baissées en inoccupation de 19h le soir jusqu'au lendemain à 7h. Un système de surventilation mécanique permet d'assurer une surventilation nocturne de 22h à 7h avec un taux de renouvellement d'air de 5 vol/h, soit 277,2 m³/h. Le bureau est équipé d'un système de ventilation mécanique pour l'hygiène en période d'occupation qui permet d'assurer 25 m³/h par personne d'air neuf, soit un débit de 50 m³/h.

Afin de pouvoir évaluer l'impact de l'acide gras et de la surventilation nocturne sur le confort thermique d'été du bureau, 5 configurations ont été simulées (voir Tableau 2.8). Le MCP est disposé sur la face intérieure du plafond et recouvre 80% de sa surface. La température opérative est utilisée comme indicateur du confort thermique, en considérant une limite du confort thermique dans un bureau de 26°C (NF EN ISO 7730, 2006). Les simulations ont été effectuées pour la période d'été (Juin – Août).

Cas	Surventilation nocturne	MCP
		Type Epaisseur
1	Non	Sans
2	Oui	Sans
3.1	Oui	Acide gras 5 mm
3.2	Oui	Acide gras 10 mm
3.3	Oui	Acide gras 25 mm

Tableau 2.8 : Cas étudiés

La Figure 2.23 montre les résultats obtenus pour une semaine de la période étudiée en considérant le climat de la ville de Trappes.

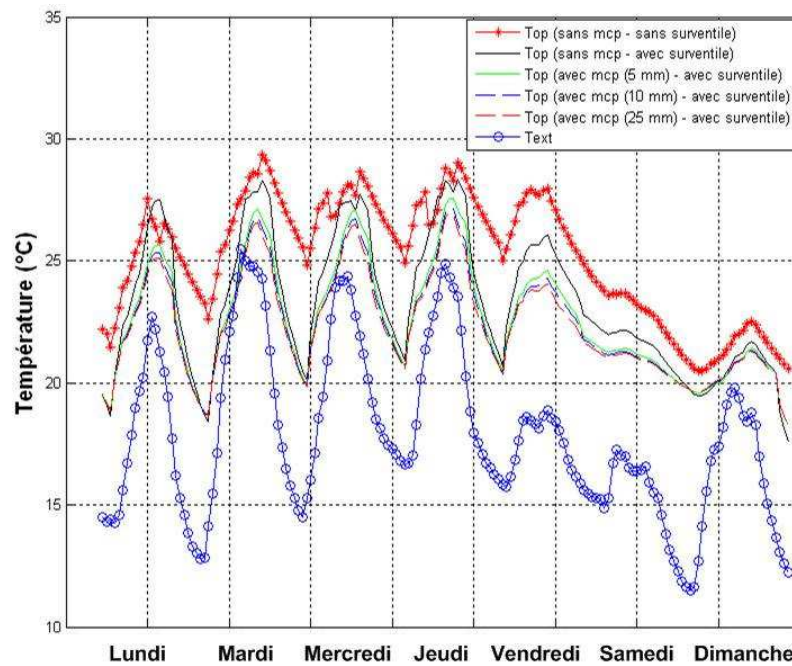


Figure 2.23 : Température opérative pour la ville de Trappes

L'acide gras, avec une épaisseur comprise entre 5 mm et 25 mm, permet d'écarter la température opérative de 1 à 2°C. Cependant, la limite de 26°C est parfois dépassée. Les conditions d'ambiance ne varient que légèrement en fonction de l'épaisseur de l'acide gras. Une épaisseur de 5 mm est donc suffisante. En effet, une partie du MCP pour les épaisseurs de 10 et 25 mm reste solide et est donc sans impact.

Le confort thermique d'été est évalué en calculant le nombre d'heures durant lesquelles le bureau est en inconfort. La Figure 2.24 montre le nombre d'heures où la température opérative est supérieure à 26°C. On constate que la surventilation nocturne, à elle seule, permet de réduire de façon significative le nombre d'heures de dépassement des limites de confort et que l'acide gras permet d'améliorer considérablement le confort thermique d'été.

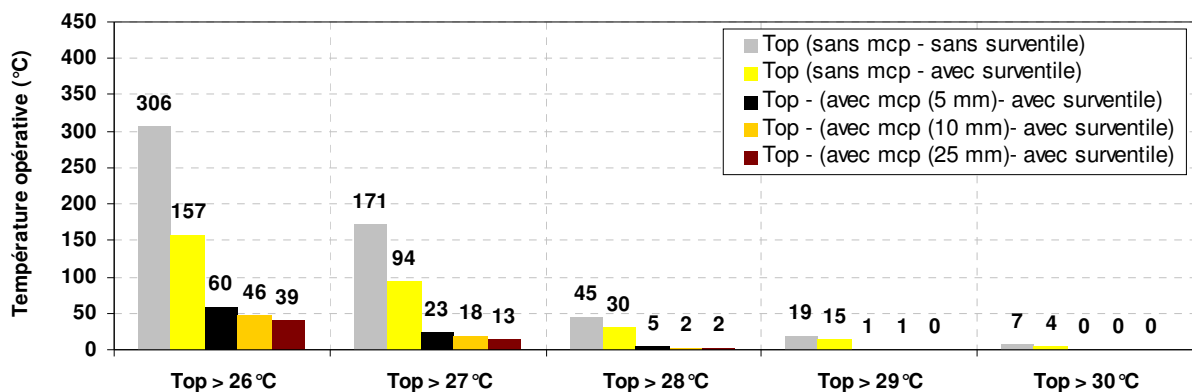


Figure 2.24 : Nombre d'heures d'inconfort pour la ville de Trappes

La Figure 2.25 montre les résultats obtenus pour une semaine de la période étudiée pour le climat de la ville de Nice. Le matériau à changement de phase considéré est toujours un acide gras. Les épaisseurs de 5 et 10 mm n'offrent aucune réduction de la température intérieure. Par contre, l'épaisseur de MCP de 25 mm permet d'écarter la température intérieure de 2 à 3°C.

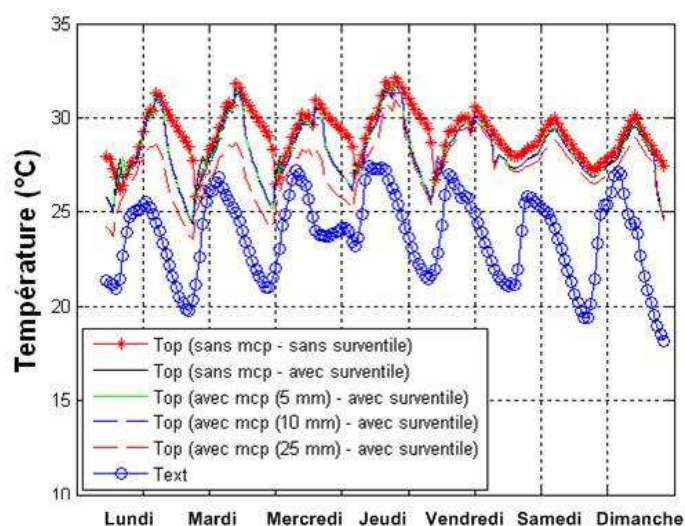


Figure 2.25 : Température opérative pour la ville de Nice

La Figure 2.26 montre le nombre d'heures durant lesquelles le bureau est en inconfort pour ce cas. On constate que l'impact de l'acide gras sur le confort thermique d'été est limité. Ceci est dû au fait que la ville de Nice présente un climat estival plus chaud que celui de la ville de Trappes, d'autant plus que les températures extérieures nocturnes ne sont pas favorables à la solidification de l'acide gras. Celui-ci reste en grande partie en phase liquide, et n'offre qu'une amélioration réduite du confort thermique d'été.

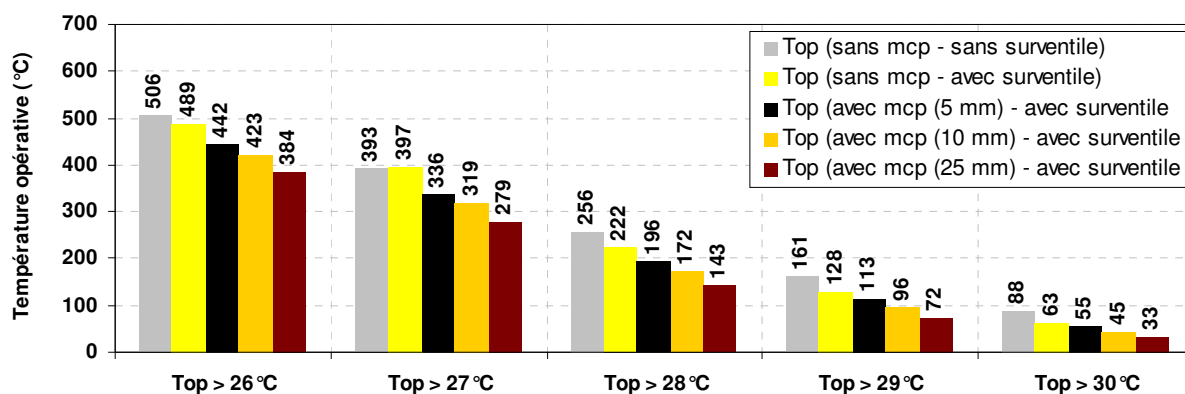


Figure 2.26 : Nombre d'heures d'inconfort pour la ville de Nice

2.7.2 Ventilation mécanique avec récupération de chaleur

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact du système de ventilation double flux avec récupération de chaleur et du système de puits climatique sur les performances énergétiques, les émissions de CO₂ et le confort thermique d'été d'une maison individuelle.

La maison individuelle s'appelle « MOZART » définie par le CSTB dans le cadre d'une étude de typologie sur le parc immobilier (voir Figure 2.27).

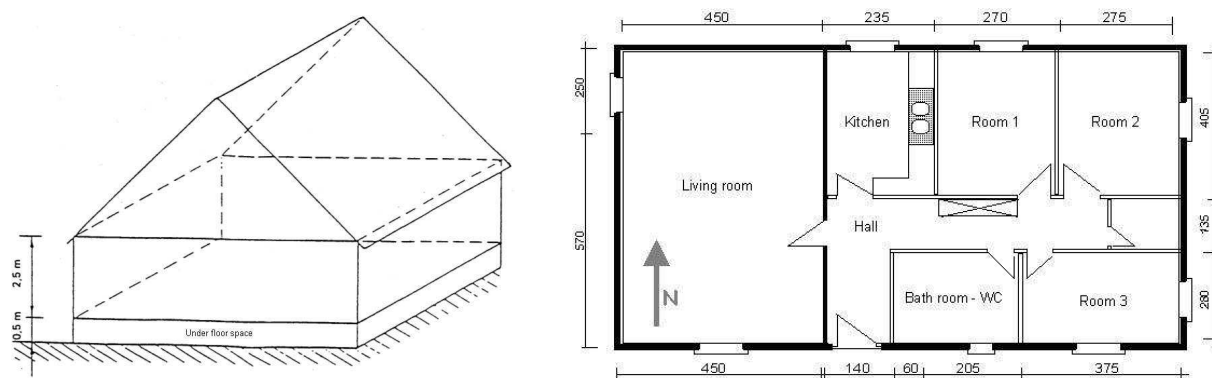


Figure 2.27 : Vues de la maison Mozart

La maison Mozart possède une superficie de 101 m², un volume de 263 m³ et un taux de renouvellement d'air par ventilation mécanique de 0,57 vol/h, soit 150 m³/h. Les caractéristiques de l'enveloppe ont été choisies selon les exigences de la réglementation thermique française RT2005 (Réglementation Thermique, 2005) (voir Tableau 2.9).

Parois	U (W/m ² K)
Mur extérieur	0,3
Plancher bas	0,21
Plancher haut	0,26
Fenêtres (double vitrage)	2,6

Tableau 2.9 : Coefficients de transmission surfacique des parois de la maison Mozart

Les simulations ont été effectuées pour les villes de Nancy, La Rochelle et Nice, caractérisées respectivement par un climat froid, modéré et chaud (voir Tableau 2.10). Les données climatiques utilisées sont issues de la réglementation thermique RT2000 (Réglementation Thermique, 2000).

	Nancy	La Rochelle	Nice
T _{min} (°C)	-11,9	-4,9	1,9
T _{max} (°C)	33,0	30,7	28,9
DH _(19 °C) (°Ch)	86384	60626	44257
DH _(26 °C) (°Ch)	257	169	207
DH _(20-26 °C) (°Ch)	1748	1935	4873
Φ _{solaire} (kWh/m ²)	1066	1293	1397

Tableau 2.10 : Caractéristiques météorologiques des villes de Nancy, La Rochelle et Nice

Le système double flux consiste à extraire l'air vicié de la cuisine et de la salle de bain, et de souffler simultanément de l'air neuf dans les autres zones. Un échangeur statique à plaques d'une efficacité sensible de 75% permet de récupérer de la chaleur sur l'air vicié afin de préchauffer l'air neuf. L'échangeur est bypassé en période estivale.

L'installation de puits climatique comprend un tube de 40 m de longueur et de 160 mm de diamètre intérieur, enterré à une profondeur de 1,8 m. Le sol est supposé être de l'argile.

L'air neuf bypass le puits climatique si sa température est comprise entre un seuil minimal déterminé selon le climat et 20 °C. Ce type de contrôle évite le fonctionnement de l'installation du puits climatique en mi-saison. Le seuil de température est déterminé pour chaque climat, de façon à être inférieur à la température minimale de sol (voir Tableau 2.11 et Figure 2.28).

Nancy	La Rochelle	Nice
5 °C	8 °C	10 °C

Tableau 2.11 : Seuils de température pour le fonctionnement du puits climatique

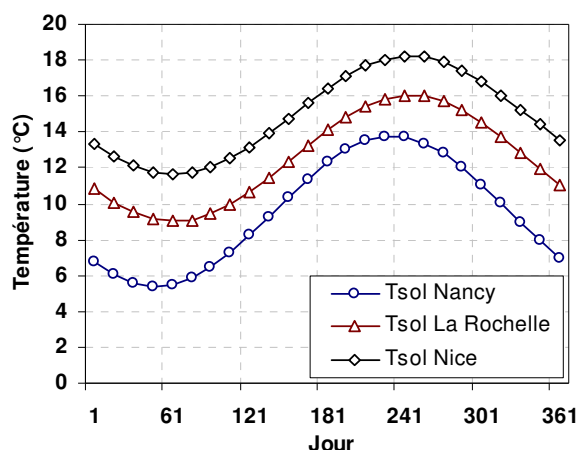


Figure 2.28 : Température de sol à une profondeur de 1,8 m pour les trois climats considérés en se basant sur les données climatiques de la réglementation thermique RT2000

Pour chaque climat, quatre configurations de systèmes ont été étudiées :

- Mozart avec une installation de ventilation mécanique simple flux (EV).
- Mozart avec une installation de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait (BV).
- Mozart avec une installation de ventilation mécanique simple flux couplé à une installation de puits climatique (EV + EAHEX).
- Mozart avec une installation de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait couplée à une installation de puits climatique (EV + EAHEX).

La Figure 2.29 montre les résultats obtenus pour les trois villes considérées. Les résultats concernent les besoins de chauffage pour une température de consigne de 19°C et la consommation d'électricité des auxiliaires de ventilation et ceci pour toutes les configurations étudiées.

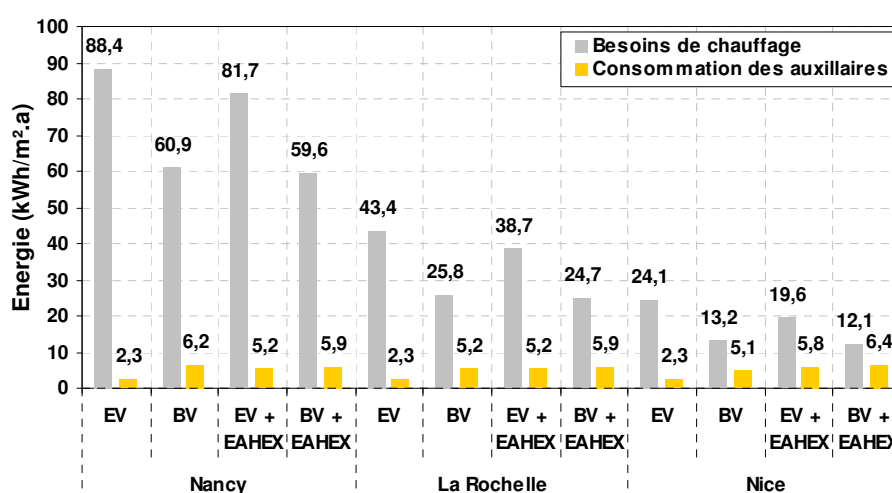


Figure 2.29 : Besoins de chauffage et consommation des auxiliaires

On constate que la ventilation double flux avec récupération de chaleur est plus efficace que le puits climatique en terme de réduction des besoins de chauffage. De plus, l'apport du puits climatique sur la réduction des besoins de chauffage, lorsqu'il est couplé avec la

ventilation double flux, est marginal. Le puits climatique permet par contre de protéger l'échangeur de la centrale double flux du risque de givrage.

Dans le but d'évaluer le potentiel du puits climatique en terme d'amélioration du confort thermique d'été, trois configurations ont été simulées :

- Mozart avec une installation de ventilation mécanique simple flux (EV).
- Mozart avec une installation de ventilation mécanique simple flux couplée à une installation de puits climatique. Le débit d'air neuf traversant le tube enterré est de 225 m³/h (EV + EAHEX, 225).
- Mozart avec une installation de ventilation mécanique simple flux couplée à une installation de puits climatique. Le débit d'air neuf traversant le tube enterré est de 450 m³/h (B²V + EAHEX, 450).

La Figure 2.30 montre le nombre de degré-heures pour lequel la température opérative est supérieure à 26°C. On constate que le puits climatique présente un grand potentiel pour améliorer le confort thermique et ceci quelque soit le climat considéré.

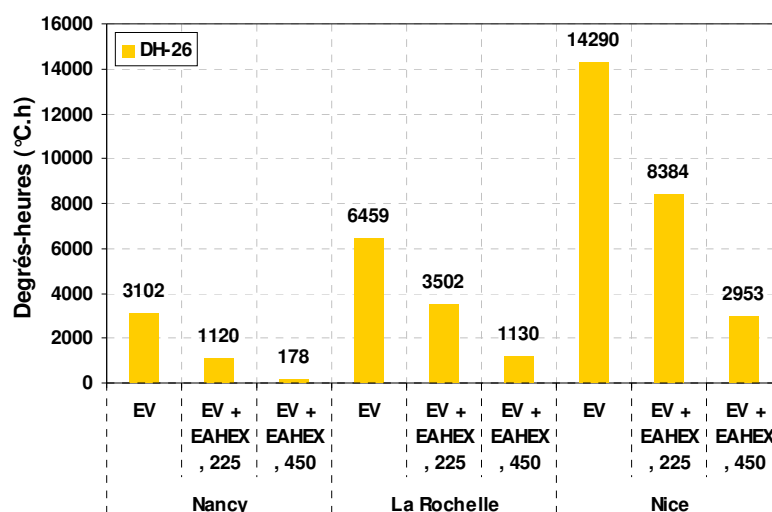


Figure 2.30 : Nombre de degré-heures de température opérative supérieure à 26°C

2.7.3 Amélioration de l'efficacité énergétique d'une maison individuelle

L'objectif de cette étude est d'évaluer les consommations d'énergie finale et primaire d'une maison individuelle couplée à différents types d'installations de génie climatique. La maison individuelle considérée est la maison MOZART décrite précédemment (voir Figure 2.27). Les caractéristiques de l'enveloppe de cette maison ont été choisies selon les critères de la réglementation thermique RT2000 (Réglementation Thermique, 2000) (voir Tableau 2.12).

Parois	U (W/m²K)
Mur extérieur	0,42
Plancher bas	0,47
Plancher haut	0,3
Fenêtres (double vitrage)	2,45

Tableau 2.12 : Coefficient de transmission surfacique des parois

Trois configurations d'installations de génie climatique ont été étudiées :

- 1^{ère} configuration : La maison MOZART est couplée à un système de ventilation simple flux et une installation de chauffage comprenant une chaudière à gaz pour le

chauffage de la maison et la production de l'eau chaude sanitaire (ECS). L'émission de la chaleur dans la maison est assurée via un plancher chauffant (voir Figure 2.31).

- 2^{ème} configuration : La maison MOZART est couplée à un système de ventilation double flux équipé d'un échangeur à plaques sur l'air extrait d'une efficacité de 75%. L'installation de chauffage et d'ECS est la même que précédemment.
- 3^{ème} configuration : La maison MOZART est couplée à un système de ventilation double flux équipé d'un échangeur à plaques sur l'air extrait d'une efficacité de 75%. Le chauffage de la maison est assuré grâce à une pompe à chaleur air-eau sur l'air extérieur. L'ECS est produite par des capteurs solaires d'une surface de 5 m² et un appoint électrique. Le système de chauffage est toujours un plancher chauffant (voir Figure 2.31).

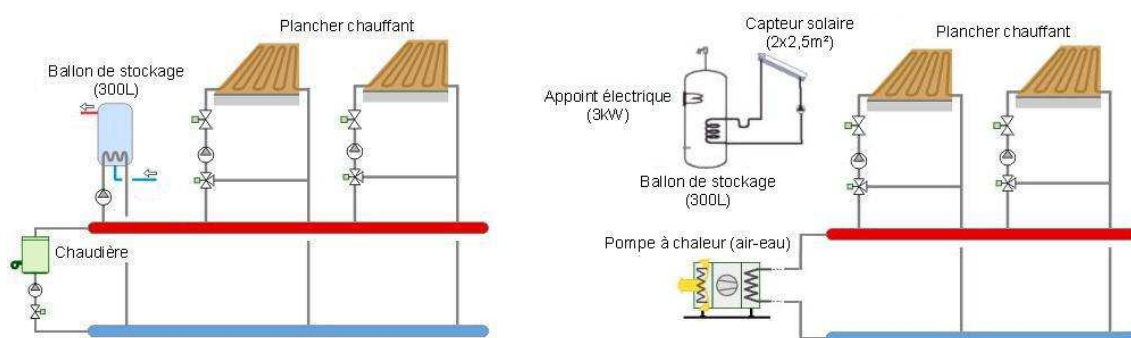


Figure 2.31 : Installations de chauffage et d'ECS étudiées

Les simulations ont été effectuées pour les climats de Nancy (froid), La Rochelle (modéré) et Nice (chaud). La température de consigne pour le chauffage est de 19°C.

La Figure 2.32 montre les consommations annuelles d'énergie finale et primaire pour la 1^{ère} configuration de systèmes. Le facteur de conversion de l'énergie finale en énergie primaire est de 2,58 pour l'électricité et de 1 pour les autres types d'énergie (Réglementation Thermique, 2005).

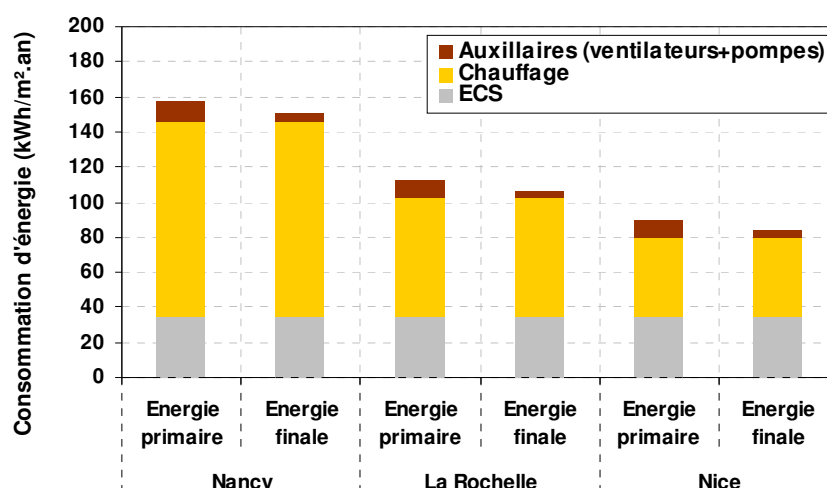


Figure 2.32 : Consommations annuelles en énergie finale et primaire de la 1^{ère} configuration

La Figure 2.33 montre les consommations annuelles d'énergie finale et primaire pour la 2^{ème} configuration. En comparant la 1^{ère} et la 2^{ème} configuration, on constate que l'utilisation de la ventilation double flux avec récupération de chaleur à la place de la ventilation simple flux, permet de réduire la consommation d'énergie finale de 22% à Nancy, 19% à La Rochelle et

16% à Nice. La consommation d'énergie primaire est réduite de 18% à Nancy, 14% à La Rochelle et 10% à Nice.

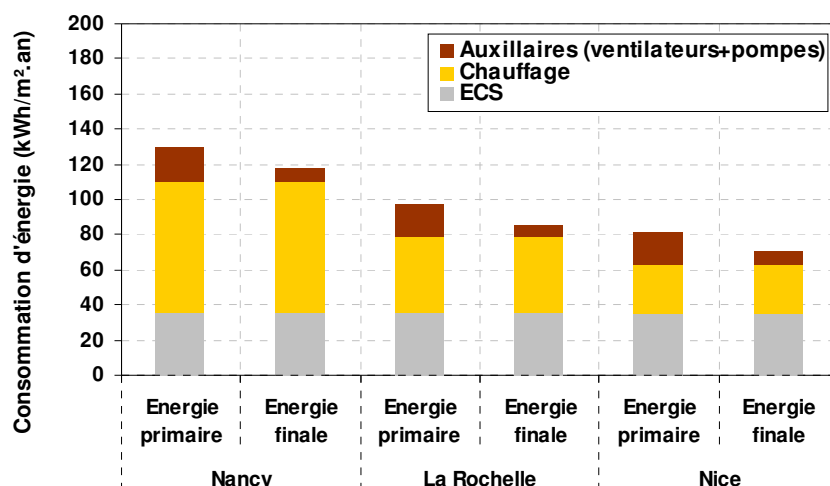


Figure 2.33 : Consommations annuelles en énergie finale et primaire de la 2^{ème} configuration

La Figure 2.34 montre la consommation d'énergie finale et primaire pour la 3^{ème} configuration. Le coefficient de performance annuelle de la pompe à chaleur est de 2,9 pour Nancy, 3,1 pour La Rochelle et 3,3 pour Nice. Les capteurs solaires couvrent 52% des besoins d'ECS à Nancy, 68% à La Rochelle et 75% à Nice.

En comparant la 2^{ème} et la 3^{ème} configuration, on peut constater que la consommation d'énergie finale est réduite de 58% à Nancy, 59% à La Rochelle et 62% à Nice. Vu que pour la 3^{ème} configuration, l'énergie consommée est uniquement de l'électricité, la réduction en énergie primaire est moins importante que celle en énergie finale. Elle est de 9% à Nancy, 19% à La Rochelle et 27% à Nice.

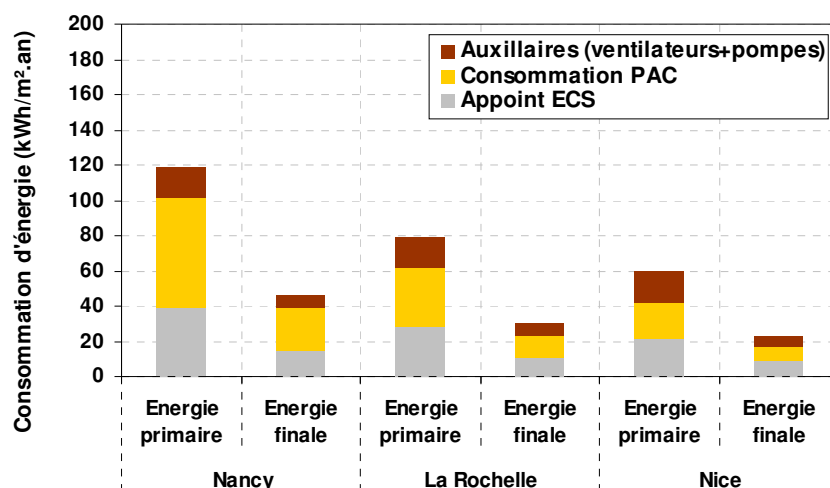
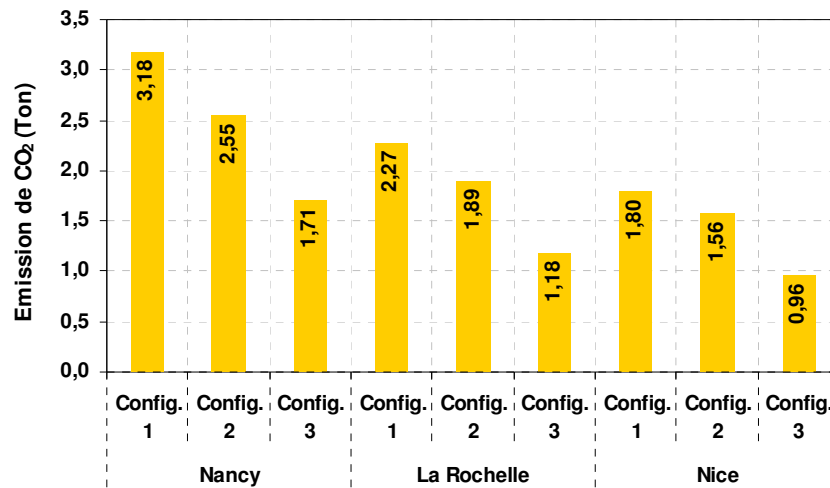


Figure 2.34 : Consommations annuelles en énergie finale et primaire de la 3^{ème} configuration

La Figure 2.35 donne les émissions de CO₂ pour les différents cas étudiés. Ces émissions ont été déterminées à l'aide de la méthode bilan carbone de l'ADEME (ADEME, 2005b).

La réduction en émission de CO₂, en utilisant un double flux au lieu d'un simple flux, est de 20% à Nancy, 17% à La Rochelle et 13% à Nice. L'utilisation d'une pompe à chaleur pour le chauffage et des capteurs solaires pour l'ECS réduit les émissions de CO₂ de 33% à Nancy, 37% à La Rochelle et 38% à Nice.

Figure 2.35 : Emissions de CO₂ pour les différents cas étudiés

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à décrire les modèles développés dans l'environnement MATLAB/SIMULINK et intégrés dans la bibliothèque SIMBAD afin de pouvoir évaluer des modes de construction et des systèmes du génie climatique permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Nous nous sommes intéressés ensuite à des études d'optimisation énergétique des bâtiments réalisées grâce aux modèles développés.

Disposant d'un outil adapté à l'étude des bâtiments à basse consommation d'énergie, nous pourrions donc par la suite aborder le développement de méthodologies d'optimisation des performances énergétiques des bâtiments.

Description de la méthode des plans d'expériences et du cas d'étude

L'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bâtiment nécessite de réaliser durant la phase conception du projet, des études paramétriques d'optimisation en vue de mettre en évidence les solutions optimales permettant d'atteindre les objectifs visés en termes de performances énergétiques et de confort thermique.

De telles études nécessitent de considérer un grand nombre de paramètres spécifiques à l'enveloppe et aux systèmes du génie climatique. Parmi ces paramètres, nous pouvons citer à titre d'exemple, l'isolation thermique des parois, la perméabilité à l'air, l'inertie thermique, le pourcentage et le type de vitrage, le COP et l'EER dans le cas d'une pompe à chaleur, ou le rendement dans le cas d'une chaudière. Plus le nombre de paramètres augmente, plus les études d'optimisations deviennent compliquées. Ce problème peut être résolu grâce à la méthode des plans d'expériences, largement utilisée dans l'industrie, pour des études d'optimisation, de contrôle de qualité et d'analyse de données.

En effet, la méthode des plans d'expériences permet d'organiser les expériences afin de pouvoir représenter à travers un modèle mathématique, le comportement du système étudié en fonction de diverses variables. Ceci est réalisé avec un minimum d'expériences et une bonne précision. Le modèle mathématique sert ensuite à étudier le comportement du système dans l'ensemble du domaine d'étude, à mettre en évidence les variables les plus influentes et à identifier des optimum. Cette méthode présente un grand intérêt pour des études paramétriques en physique du bâtiment et plus précisément pour des études d'optimisation. Elle permet en effet de simplifier l'étude en réduisant considérablement le nombre de simulations (expériences) à effectuer afin de mettre en évidence les solutions optimales du problème considéré.

La méthodologie de conception de bâtiment à basse consommation d'énergie que nous proposons, est basée sur la méthode de plans d'expériences. Cette méthodologie est appliquée sur immeuble de bureaux dont les caractéristiques de base respectent les exigences de la réglementation thermique française (Réglementation Thermique, 2005). Ces caractéristiques seront appelées « configuration de référence » par rapport auquel les configurations optimisées sont comparées en termes de performances énergétiques, de confort thermique et d'émission de CO₂.

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques thermiques de base ou « configuration de référence » du bâtiment. Les performances énergétiques de ce bâtiment sont évaluées par rapport aux différents climats définis par la réglementation thermique (Réglementation Thermique, 2005). Trois climats représentatifs sont uniquement retenus pour la suite du travail. Enfin, nous présentons les principes de base de la méthode des plans d'expériences et un exemple de son application dans une étude d'optimisation énergétique de la configuration de référence du bâtiment.

3.1 Description du cas d'étude

3.1.1 Généralités

Le cas d'étude est un immeuble de bureaux, appelé Beethoven, avec trois niveaux de 540 m² de surface totale, orienté Nord/Sud (voir Figure 3.1, Figure 3.2 et Figure 3.3). La plupart des pièces sont aménagées en bureaux avec deux toilettes par étage. L'accès aux différentes pièces est assuré par des couloirs et des escaliers permettant la liaison entre les étages.

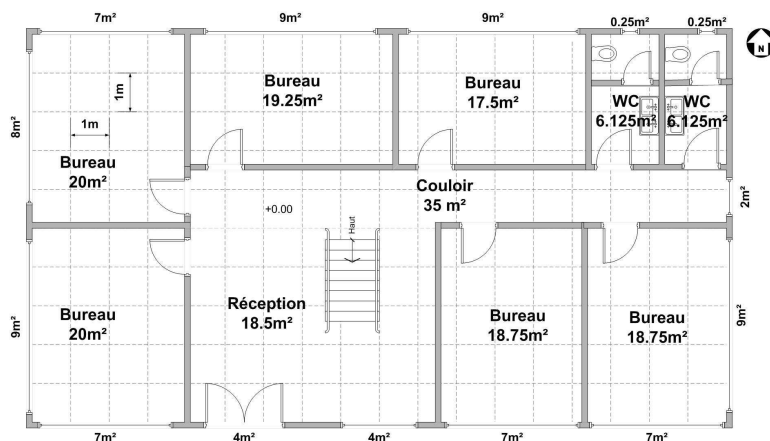


Figure 3.1 : Plan du RDC du bâtiment Beethoven

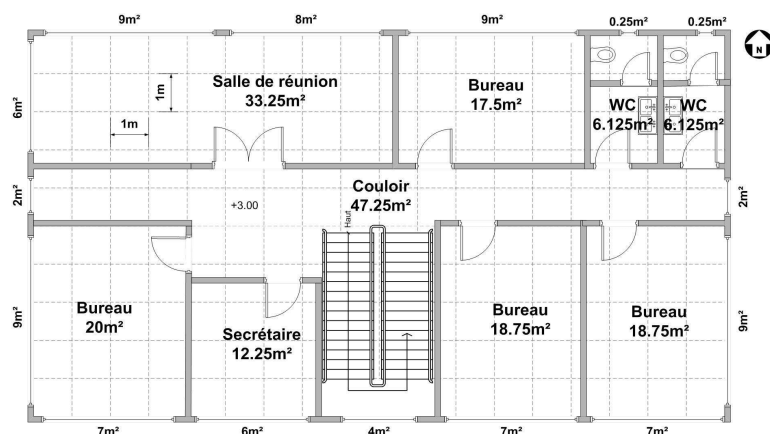


Figure 3.2 : Plan du 1er étage du bâtiment Beethoven

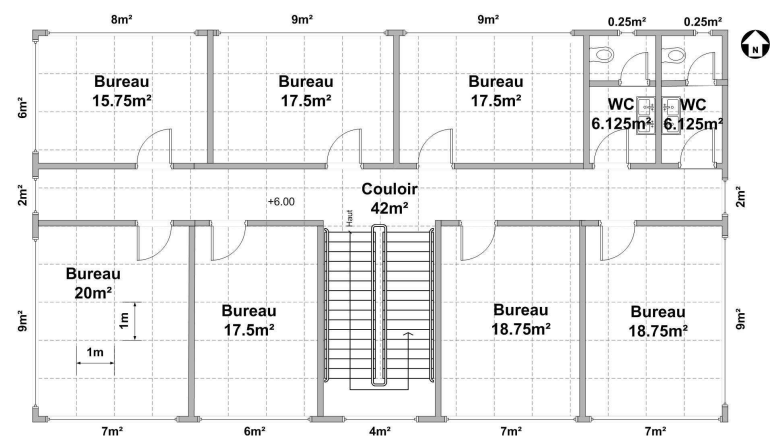


Figure 3.3 : Plan du 2^{ème} étage du bâtiment Beethoven

3.1.2 Caractéristiques de l'enveloppe

Après la géométrie, il est nécessaire de définir l'enveloppe du bâtiment que nous décomposons en parois opaques et parois vitrées. Les caractéristiques de base de l'enveloppe ont été choisies selon les exigences de la réglementation thermique en cours à savoir la RT2005 (Réglementation Thermique, 2005). Nous soulignons que pour la suite, les caractéristiques de base du bâtiment seront nommées « configuration de référence ».

Parois opaques : Nous supposons que les caractéristiques thermo-physiques des parois opaques sont les mêmes pour tous les climats (voir Tableau 3.1).

Elément	Matériau (int. → ext.)	e (m)	λ (W/mK)	Cp (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
Mur extérieur	Plâtre	0,01	0,35	800	850
	Polystyrène extrudé	0,10	0,03	1200	35
	Parpaing	0,20	0,53	920	950
Plancher bas (sur terre plein)	Béton plein	0,20	1,75	920	2300
	Polystyrène extrudé	0,15	0,03	1200	35
Plancher haut (avec faux plafond)	Vermiculite	0,02	0,14	920	400
	Air	0,30	1,5	1008	1,21
	Béton plein	0,20	1,75	920	2300
	Polyuréthane	0,20	0,03	837	30
	Etanchéité	0,01	0,23	920	1050
	Vermiculite	0,02	0,14	920	400
Plancher intermédiaire (avec faux plafond)	Air	0,30	1,5	1008	1,21
	Béton plein	0,20	1,75	920	2300
	Plâtre	0,03	0,35	800	850
Mur intérieur	Air	0,03	0,03	1008	1,24
	Plâtre	0,03	0,35	800	850

Tableau 3.1 : Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques

Les Tableau 3.2 et Tableau 3.3 donnent les coefficients de transmission thermique des parois opaques et des ponts thermiques ainsi que les valeurs limites imposées par la réglementation thermique.

Parois	U (W/m ² K)	Limite réglementaire (W/m ² K)
Mur extérieur	0,280	0,45
Plancher bas	0,205	0,36
Plancher haut	0,105	0,34

Tableau 3.2 : Coefficient de transmission surfacique des parois opaques

Liaison	Ψ (W/mK)	Limites réglementaires (W/mK)
Mur extérieur / Mur extérieur	0,025	1,2
Mur extérieur / Plancher bas	0,62	1,2
Mur extérieur / Plancher intermédiaire	0,44	1,2
Mur extérieur / Plancher haut	0,84	1,2

Tableau 3.3 : Coefficient de transmission thermique des ponts thermiques

Parois vitrées : Les parois vitrées constituent 50% de la surface totale des parois verticales. Elles sont constituées d'un double vitrage (4/16/4) rempli d'air avec une menuiserie en PVC et des protections solaires extérieures mobiles, supposées opaques (voir Tableau 3.4).

Type de vitrage	U _w (W/m ² K) Sans protection	U _w (W/m ² K) Avec protection	τ_{diffus}	α_{diffus}
Double vitrage (4/16/4)	2,60	2,15	0,63	0,14

Tableau 3.4 : Caractéristiques des parois vitrées

La Figure 3.4 donne la dépendance angulaire des coefficients de transmission et d'absorption du rayonnement solaire direct.

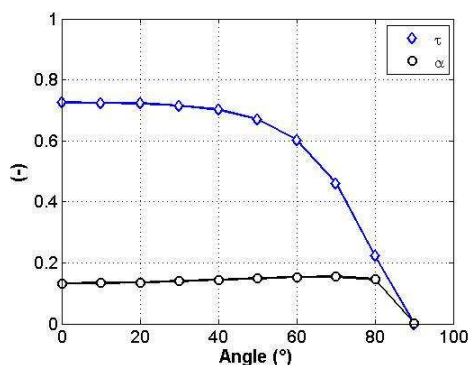


Figure 3.4 : Dépendance angulaire des coefficients de transmission et d'absorption du rayonnement solaire direct

Protections solaires : Nous tenons compte de l'occultation de l'éclairement solaire en considérant que les fenêtres sont munies d'une protection solaire mobile extérieure, supposée opaque.

Afin de simuler l'occultation des fenêtres, nous supposons que les stores sont ouverts à 50% durant la période d'occupation du bâtiment, et totalement fermées en période d'inoccupation.

Perméabilité à l'air : La valeur de la perméabilité de l'enveloppe est fixée à la valeur de référence définie par la réglementation thermique (Réglementation Thermique, 2005) qui est de $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 de surface déperditive sous 4 Pa, pour un immeuble de bureaux. Le sol est considéré étanche.

Au vu de toutes ces données et au sens de la réglementation thermique, les déperditions totales par transmission à travers l'enveloppe par degré d'écart entre l'intérieur et l'extérieur est de $800,9 \text{ W/K}$, réparties comme suit : 14,4% pour les parois opaques, 74,9% pour les parois vitrées et 10,7% pour les ponts thermiques.

Si nous considérons un débit d'air extrait réglementaire de $1095 \text{ m}^3/\text{h}$ et en omettant la perméabilité de l'enveloppe, nous obtenons un ratio déperditions par renouvellement d'air/déperditions totales de 0,31.

3.1.3 Scénarios d'occupation

Charges internes dues aux occupants : La production d'énergie métabolique se mesure en met. 1 met correspond au métabolisme d'une personne au repos et vaut $58,2 \text{ W/m}^2$ par unité de surface corporelle sachant que la surface corporelle d'un individu moyen est de $1,8 \text{ m}^2$ (voir Tableau 3.5).

Activité	Production d'énergie métabolique	
	(W/m ²)	(Met)
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1,0
Activité sédentaire (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2,0
Marche à plat		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Tableau 3.5 : Production d'énergie métabolique (NF EN ISO 7730, 2006)

On considère que les occupants ont une activité sédentaire, c'est-à-dire que chaque occupant dégage une puissance totale (sensible et latente) de 126 W. La part sensible de cette puissance est de 82 W divisée équitablement entre une part convective et une part radiative (Energie+, 2006). De plus l'apport d'humidité par occupant est de 2.10^{-5} kg/s (AIVCF, 1999).

Profil d'occupation : On considère qu'il y a deux personnes par bureau, sauf pour le secrétariat du 1^{er} étage, où une seule personne est présente. Enfin 2 personnes sont à la réception et il n'y a personne dans les espaces de circulation et les sanitaires.

Le profil d'occupation des bureaux prend en compte une absence partielle de 20% du personnel, ainsi qu'un arrêt partiel de travail pendant la période du déjeuner (voir Figure 3.5).

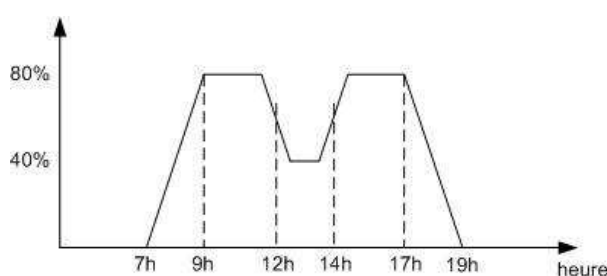


Figure 3.5 : Scénario d'occupation des bureaux

Les salles de réunion sont dimensionnées pour accueillir une personne pour 3,5 m² (AICVF et al, 1993). Ceci correspond dans notre cas à 10 personnes. La Figure 3.6 donne le profil d'occupation retenu, issu d'enquêtes (Colombier et al, 1996).

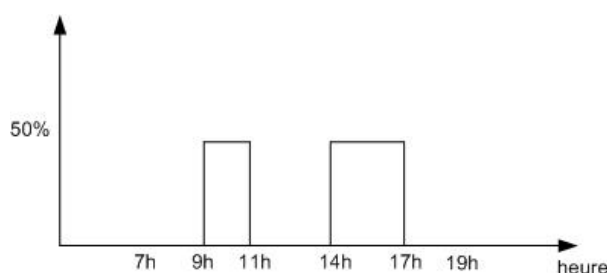


Figure 3.6 : Scénario d'occupation de la salle de réunion

Au vu de toutes ces données, la puissance maximale due aux occupants, rapportée à la surface totale du bâtiment, est de 5,2 W/m².

3.1.4 Caractéristiques des usages

Les usages regroupent les équipements de bureautique et l'éclairage artificiel.

Les équipements de bureautique : Nous considérons un ordinateur par personne ainsi qu'une imprimante, un photocopieur et un fax par couloir.

Les ordinateurs sont équipés d'écran plat 15". Le Tableau 3.6 donne les puissances dissipées par les équipements de bureautique pour leurs différents modes de fonctionnement (ENERTECH, 2005).

Type d'équipement	Valeur moyenne (W)
Unité centrale en fonctionnement	47,0
Unité centrale en veille	20,0
Unité centrale en arrêt	2,8
Écran Plat 15" active	21,0
Écran Plat 15" en veille	1,7
Écran Plat 15" en arrêt	1,7
Imprimante laser active	52,0
Imprimante laser en veille	17,5
Photocopieur actif	153,0
Photocopieur en veille	25,0
Fax actif	25,0
Fax en veille	5,0

Tableau 3.6 : Puissances dissipées par les équipements de bureautique

Le Tableau 3.7 donne la durée des états, actif, en veille et éteint pour les différents types d'appareils de bureautique ainsi que la puissance dissipée correspondante, en période d'occupation et d'inoccupation.

Equipement	Occupation		Inoccupation	
	Etat	Puissance (W)	Etat	Puissance (W)
Ordinateur	40% actif	40,2	éteint	4,5
	60% en veille			
Imprimante	25% active	26,1	en veille	17,5
	75% en veille			
Photocopieur	25% actif	57,0	en veille	25,0
	75% en veille			
Fax	25% actif	10,0	en veille	5,0
	75% en veille			

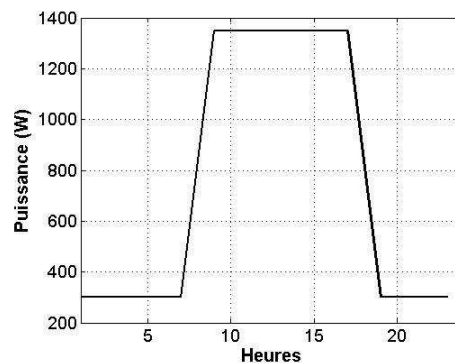
Tableau 3.7 : Durée des états de fonctionnement pour chaque appareil de bureautique et la puissance dissipée correspondante

Le Tableau 3.8 donne le type d'équipement de bureautique selon le type d'usage de la zone, ainsi que l'apport interne total correspondant.

Type d'usage	Equipements de bureautique	
	Nombre, type	Occupation / Inoccupation [W]
Bureau	2 ordinateurs	80,4 / 9,0
Bureau de la secrétaire	1 ordinateur	40,2 / 4,5
Salle de réunion	-	-
Réception	-	-
Couloir	1 photocopieur	93,1 / 47,5
	1 imprimante/fax	

Tableau 3.8 : Apports internes dus aux appareils de bureautique selon le type de pièce

La Figure 3.7 illustre le profil des gains internes dus aux appareils de bureautique en supposant une absence partielle du personnel de 20%.

**Figure 3.7 : Puissance interne due aux équipements de bureautique pour le bâtiment**

A partir de ces données, la puissance maximale due aux équipements de bureautique, rapportée à la surface totale du bâtiment, est de 3,3W/m².

L'éclairage artificiel : La puissance d'éclairage installée dans les bureaux et la salle de réunion est de 12 W/m^2 (pour un éclairage de 500 lux). L'éclairage dans les espaces de circulation est de 10 W/m^2 tandis que celui dans les sanitaires est de 6 W/m^2 .

L'éclairage artificiel est éteint en période d'inoccupation. En période d'occupation, le taux d'utilisation de l'éclairage artificiel dans les bureaux varie selon un profil standard en fonction de la saison (Colombier et al, 1996) (voir Figure 3.8 et Figure 3.9), celui des sanitaires est fixé à 40%. L'éclairage des couloirs fonctionne en permanence.

Au vu de ces données, la puissance maximale due à l'éclairage artificiel, rapportée à la surface totale du bâtiment, est de 11 W/m^2 .

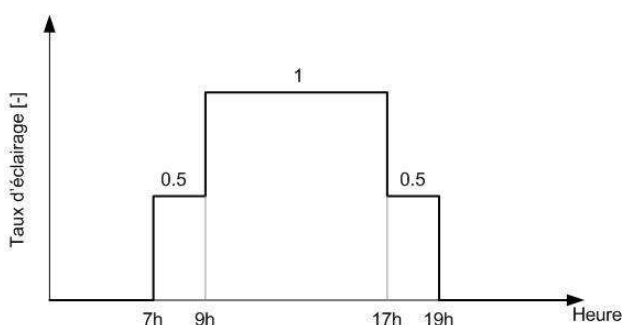


Figure 3.8 : Taux d'utilisation de l'éclairage artificiel pour le bâtiment en hiver (Octobre – Mars)

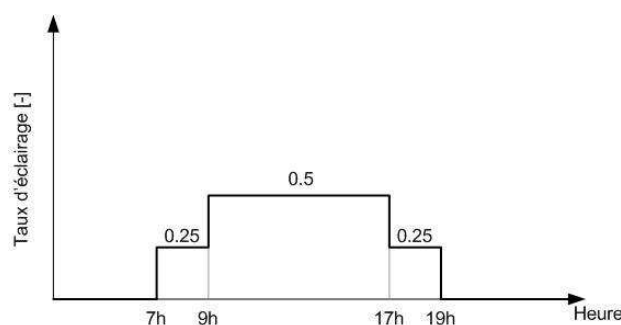


Figure 3.9 : Taux d'utilisation de l'éclairage artificiel pour le bâtiment en été (Avril – Septembre)

3.1.5 Caractéristiques du système de ventilation

Le système de ventilation de référence choisi est un système simple flux avec extraction. Ce système consiste à extraire l'air vicié des sanitaires et des circulations au moyen d'un ventilateur d'extraction central, ce qui met le bâtiment en dépression par rapport à l'environnement extérieur. L'air neuf est introduit dans les bureaux au moyen de bouches autoréglables, placées en façade dans les menuiseries. Les transferts d'air entre les bureaux et les couloirs/sanitaires se font, soit par un détalonnage des portes, soit par des passages appropriés avec des grilles à chevrons ou autre.

Le dimensionnement de ce système est basé sur la normalisation française (DTU 68.1, 1995). Les entrées d'air sont autoréglables de type passif de module 22 et 30, disponibles sur le marché français et conformes à la norme NF E51-732 (2005) (voir Figure 3.10).

Les débits de renouvellement d'air sont choisis selon les règlements sanitaires (ADEME, 1993) (voir Tableau 3.9). Le débit total de renouvellement d'air est de $1095 \text{ m}^3/\text{h}$. En période d'inoccupation, l'installation de ventilation est arrêtée. Elle est remise en route une heure avant le début de l'occupation.

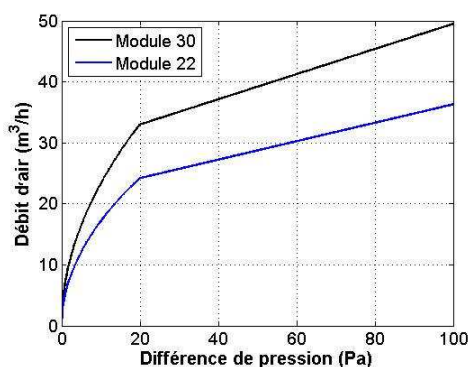


Figure 3.10 : Caractéristiques des entrées d'air autoréglables de Module 22 et 30

Usage	Débit d'air neuf
Bureau	25 m ³ /h par personne
Salle de réunion	5,1 m ³ /h par m ²
Réception	25 m ³ /h par personne

Tableau 3.9 : Débit de renouvellement d'air

Le ventilateur central utilisé est à vitesse constante fonctionnant uniquement en période d'occupation et présente un rendement global de 0,2. La puissance absorbée par le ventilateur est de 290 W pour une perte de charge du circuit aéraulique de 190,5Pa.

3.1.6 Caractéristiques de l'installation de climatisation

L'installation de climatisation comprend une pompe à chaleur réversible air – eau, et un réseau hydraulique véhiculant la chaleur produite par la pompe à chaleur vers des unités terminales de ventilo-convecteurs 2 tubes – 2 fils (voir Figure 3.11).

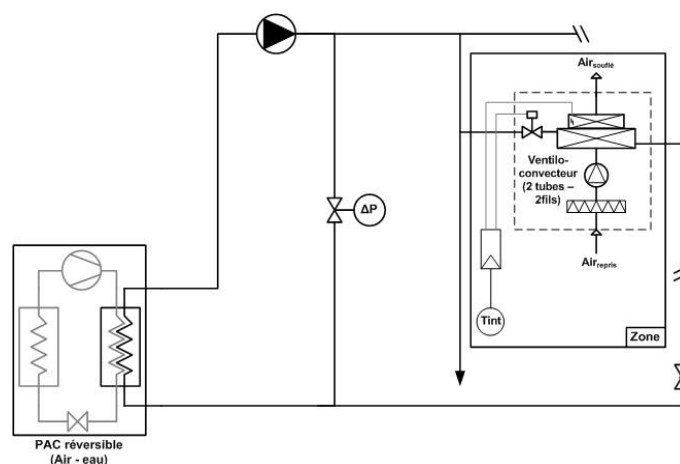


Figure 3.11 : Schéma de principe du système de climatisation

Pompe à chaleur : Il s'agit d'une pompe à chaleur réversible air – eau sur l'air extérieur assurant le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment. Le basculement du mode chaud en mode froid, souvent appelé change over (COV), est basé sur la température extérieure (voir Figure 3.12).

La régulation de la pompe à chaleur se fait sur la température de départ de l'eau qui est de 40°C en hiver et de 7°C en été. La durée de l'anti-court cycle est de 15mn.

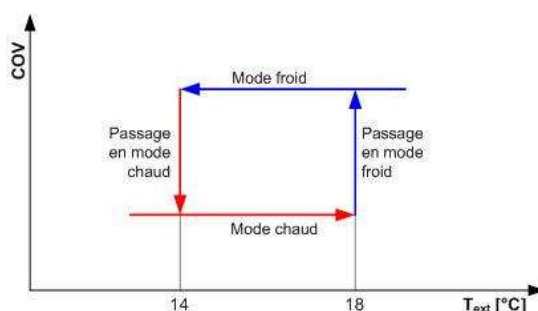


Figure 3.12 : Basculement du mode chaud au mode froid

Ventilo-convecteurs : Il s'agit de ventilo-convecteurs 2 tubes – 2 fils. La batterie à eau est alimentée alternativement en eau chaude en hiver, et en eau glacée en été. La résistance électrique intervient pendant la période de chauffage comme appoint de la batterie à eau.

La régulation du débit d'eau dans chaque batterie est effectuée à l'aide d'une vanne deux voies commandée par un régulateur de type proportionnel intégral (PI), en fonction de la température intérieure. La régulation de la batterie électrique est de type proportionnel (P).

3.1.7 Evaluation des performances énergétiques

3.1.7.1 Introduction

Les performances énergétiques du bâtiment pour la configuration de référence ont été évaluées via des simulations numériques en tenant compte des différents climats définis par la réglementation thermique RT2005.

Deux séries de simulations numériques ont été effectuées :

- La première consiste à évaluer les besoins de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment ainsi que les consommations d'électricité de l'installation d'éclairage artificiel, des équipements de bureautique et des auxiliaires de la ventilation mécanique.

Ceci permet d'une part de mettre en évidence les besoins les plus significatifs et leurs variations en fonction du contexte climatique ; et d'autre part de dimensionner l'installation de climatisation à partir des puissances maximales obtenues pour le chauffage et le rafraîchissement. De plus, ces résultats vont être décisifs pour réduire le nombre de climat à prendre en compte en sélectionnant les plus représentatifs.

Les besoins de chauffage et de rafraîchissement sont calculés en supposant un système « parfait » pour le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment qui fournit les puissances nécessaires pour maintenir la température de consigne en équilibrant les différentes pertes et apports de chaleur.

- La deuxième série de simulations consiste à évaluer les performances du bâtiment avec son installation de climatisation de pompe à chaleur et ventilo-convecteurs 2 tubes – 2 fils, en termes de consommation d'énergie finale, primaire et d'émission de CO₂.

Le Tableau 3.10 indique les températures de consigne de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment, en périodes d'occupation et d'inoccupation (Réglementation Thermique, 2005).

Le passage de la température de consigne en inoccupation à celle en occupation (relance), s'effectue deux heures avant le début de la période d'occupation, c'est-à-dire à 5h.

Usage	Consigne en occupation	Consigne en inoccupation
Chauffage	19 °C	16 °C
Rafraîchissement	26 °C	30 °C

Tableau 3.10 : Températures de consigne pour le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment

La période de chauffage pour chaque zone climatique est calculée en se basant sur la méthode définie dans la réglementation thermique (Réglementation Thermique, 2005). Cette méthode consiste à calculer la moyenne glissante des besoins de chauffage sur une période de 4 semaines à compter du 1^{er} janvier. La période de chauffage s'arrête quand la moyenne glissante devient inférieure à 1 W/m² et redémarre quand elle devient supérieure (voir Tableau 3.11).

Zone climatique	Période de chauffage
H1a - Trappes	12 Septembre – 2 Mai
H1b - Nancy	9 Septembre – 6 Mai
H1c - Mâcon	25 Septembre – 22 Avril
H2a - Rennes	26 Septembre – 29 Avril
H2b - La Rochelle	2 Octobre – 16 Avril
H2c - Agen	30 Septembre – 15 Avril
H2d - Carpentras	7 Octobre – 26 Mars
H3 - Nice	22 Octobre – 18 Mars

Tableau 3.11 : Période de chauffage pour les huit zones climatiques

3.1.7.2 Découpage en zones du bâtiment

Chaque étage du bâtiment est divisé en cinq zones thermiques. La température de l'air est supposée uniforme dans chaque zone. Le nombre total de zone thermique au niveau du bâtiment est de 15 (voir Figure 3.13).

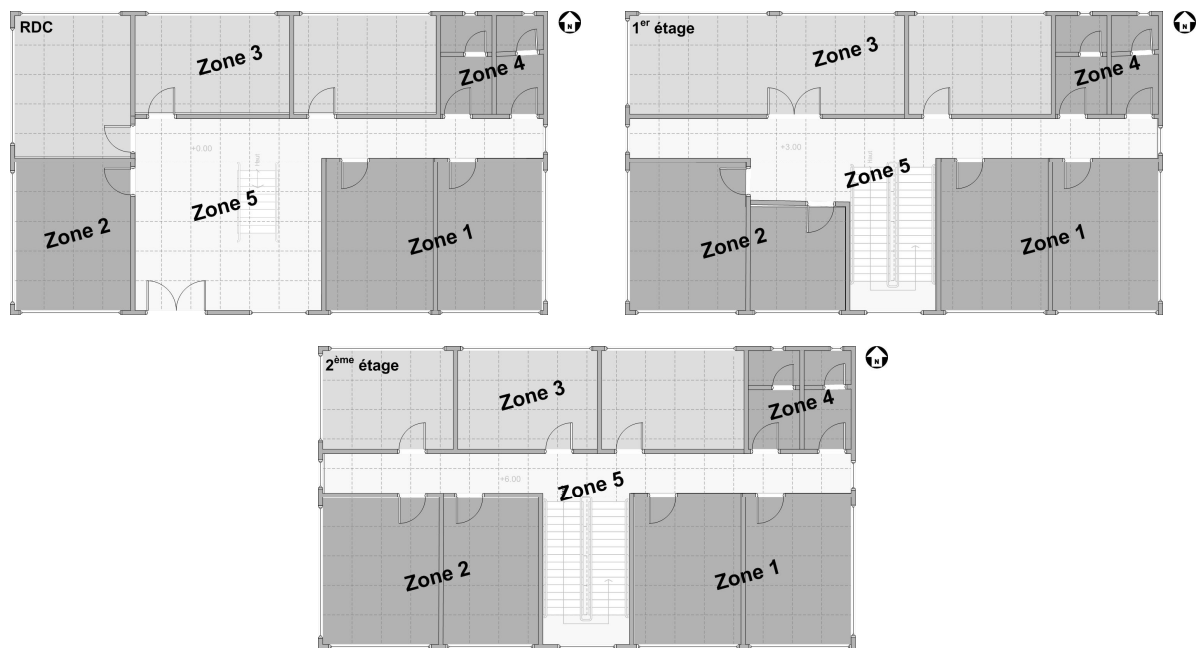


Figure 3.13 : Découpage en zones thermiques du bâtiment

3.1.7.3 Données météorologiques

Les besoins de chauffage sont liés aux écarts de température, en période hivernale, entre l'intérieur et l'extérieur. Cet écart devient moins important en période estivale et a donc moins d'influence sur les besoins de rafraîchissement qui sont surtout liés aux apports solaires et aux gains internes. Il s'avère donc nécessaire de quantifier et d'analyser les paramètres météorologiques qui influencent les besoins énergétiques.

La réglementation thermique française RT2005 définit huit zones climatiques. La Figure 3.14 donne les fréquences cumulées de la température de l'air extérieur pour les huit villes choisies.

La température minimale atteinte est de $-9,7^{\circ}\text{C}$ à Nancy et la température maximale atteinte est de $36,9^{\circ}\text{C}$ à Agen. On constate que ces températures sont rarement inférieures à -2°C et rarement supérieures à 28°C . Il apparaît également, que les fréquences cumulées sont bornées par les sites de Nancy et Nice (à part Carpentras qui présente quelques températures estivales supérieures à celles de Nice), Agen étant en quelque sorte une moyenne.

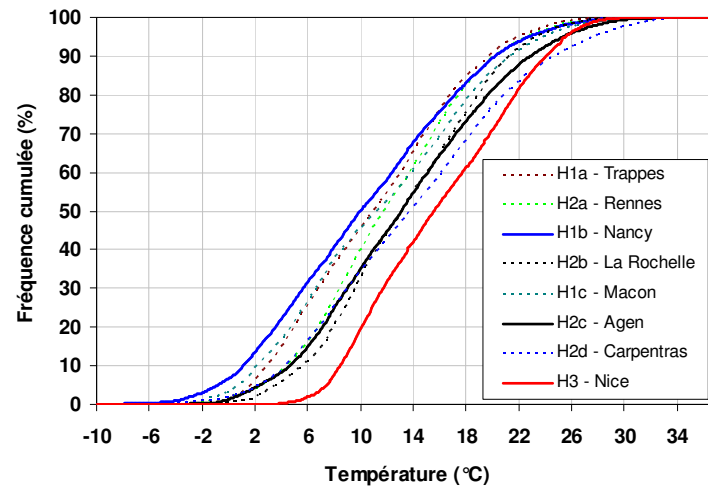


Figure 3.14 : Fréquences cumulées annuelles de la température extérieure des climats étudiés

Ceci se traduit par une valeur des degrés-heures de chauffage pour des températures extérieures inférieures à 19°C, maximale à Nancy, moyenne à Agen et minimale à Nice (voir Figure 3.15). Les degrés-heures de rafraîchissement pour des températures extérieures supérieures à 26°C ne suivent pas le même schéma. A Nice, par exemple, la présence de la méditerranée tempère les valeurs des températures extérieures avec une valeur maximale de 30°C. Par contre, Nice présente le nombre maximal de degrés-heures pour des températures extérieures comprises entre 21°C et 26°C (voir Figure 3.16).

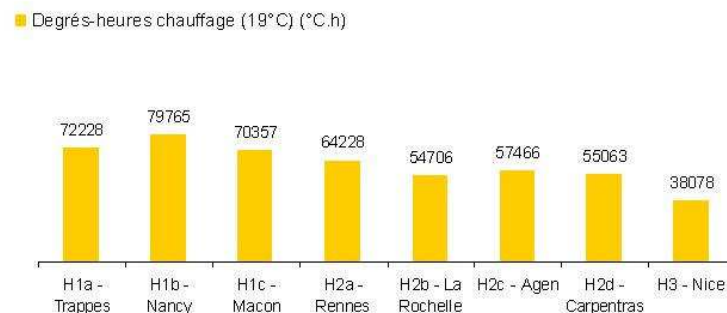


Figure 3.15 : Nombre de Degré heures de chauffage des climats étudiés

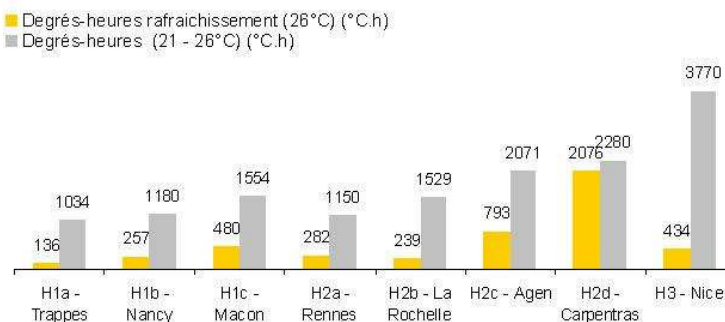


Figure 3.16 : Nombre de Degré heures de rafraîchissement des climats étudiés

La Figure 3.17 donne les irradiations solaires globales sur un plan horizontal pour les huit climats étudiés. Nous notons que les villes du nord, à savoir Trappes, Nancy et Rennes, présentent un niveau d'irradiation solaire très proche. Il en est de même pour les villes du

sud, Carpentras et Nice. Les villes de La Rochelle, Mâcon et Agen bénéficient d'un ensoleillement très similaire et intermédiaire aux valeurs évoquées précédemment.

La Figure 3.18 regroupe dans un seul graphique les principales caractéristiques météorologiques des huit zones climatiques. En abscisse, on retrouve le nombre de degrés-heures de chauffage ($T_{\text{ext}} < 19^\circ\text{C}$) et en ordonnées, l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal. Le nombre de degrés-heures de rafraîchissement ($T_{\text{ext}} > 26^\circ\text{C}$) est indiqué entre parenthèses.

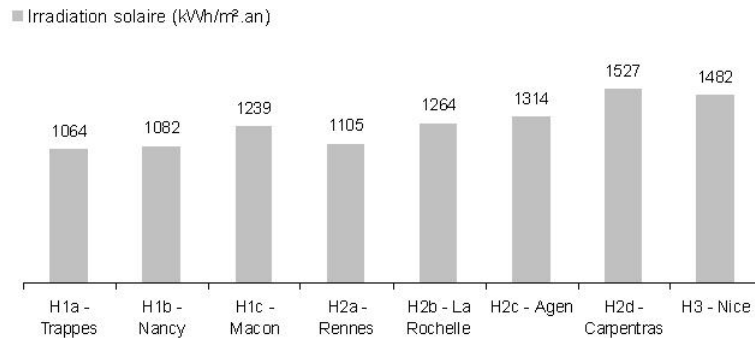


Figure 3.17 : Irradiation solaire globale annuelle sur un plan horizontal des climats étudiés

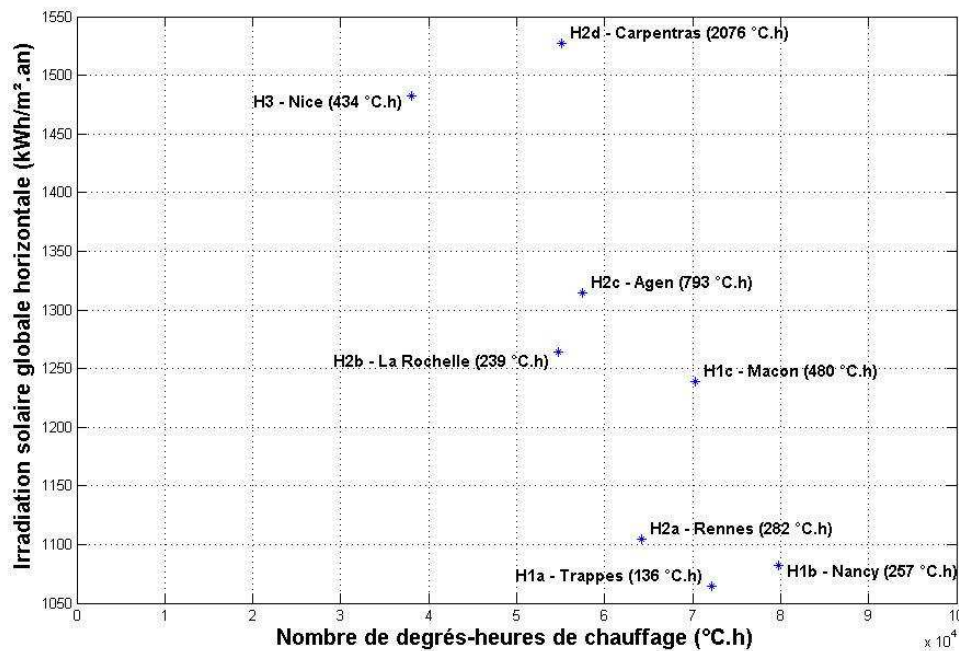


Figure 3.18 : Représentation graphique des climats étudiés (entre parenthèses : degrés-heures de rafraîchissement pour $T_{\text{ext}} > 26^\circ\text{C}$)

Compte tenu de ces données, on peut classer ces climats en trois catégories :

- Climats froids : Nancy, Trappes, Rennes et dans une moindre mesure Mâcon.
- Climats modérés : Agen, et La Rochelle.
- Climats chauds : Nice et Carpentras.

3.1.7.4 Besoins énergétiques

Il s'agit ici d'évaluer les besoins de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment ainsi que les consommations d'électricité pour l'éclairage artificiel, les équipements de bureautique et

les auxiliaires de la ventilation mécanique, afin de mettre en évidence les postes les plus significatifs en termes de consommations d'énergie et la variation de ces consommations en fonction du climat

Les résultats présentés à la Figure 3.19 ont été obtenus à l'aide des modèles décrits au chapitre 2. Le pas de temps utilisé pour les simulations numériques est de 5 min.

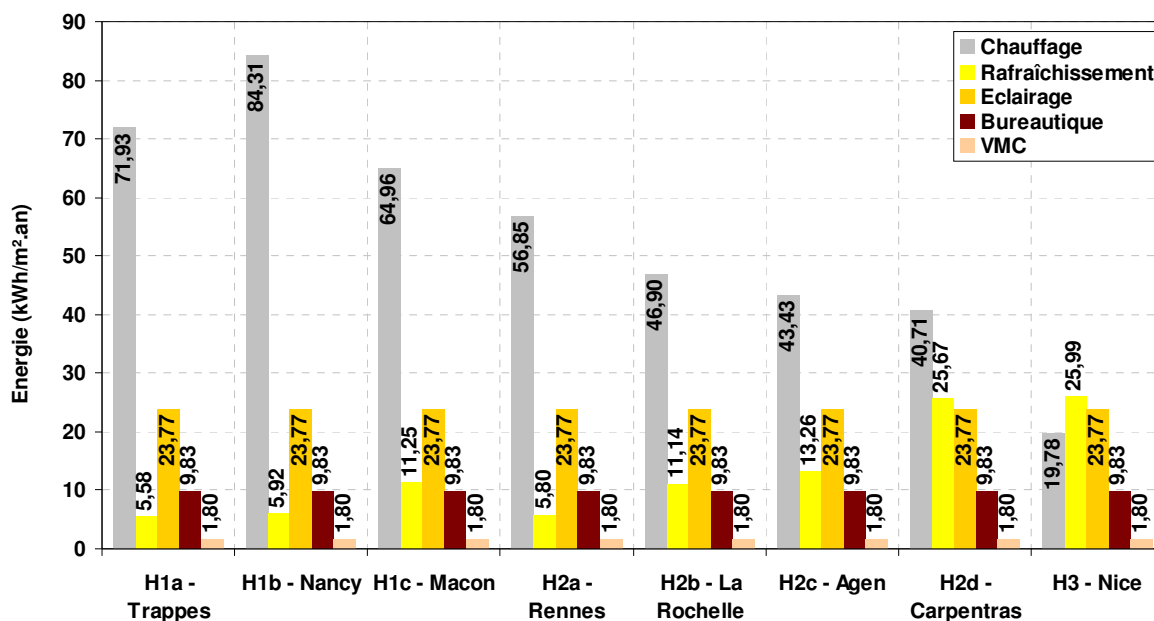


Figure 3.19 : Besoins et consommations énergétiques du bâtiment pour la configuration de référence pour les climats étudiés

Les résultats présentés à la Figure 3.19 appellent plusieurs commentaires :

- Le maximum des besoins de chauffage est obtenu à Nancy. Ce poste constitue la part la plus importante des besoins énergétiques, à l'exception de Nice, où le rafraîchissement constitue le poste le plus important.
- Le maximum des besoins de rafraîchissement est obtenu à Carpentras et Nice. Ce poste est marginal comparé aux besoins de chauffage pour les autres villes. Il augmente en descendant vers le sud, pour devenir ensuite le poste le plus important à Nice.

Compte tenu des ordres de grandeur pour les climats froids et modérés, il semble possible de couvrir une grande partie voire la totalité de ce besoin via des solutions passives.

- La consommation d'électricité pour l'éclairage artificiel constitue une part importante du bilan énergétique. Cette consommation est même beaucoup plus importante que le besoin de rafraîchissement pour les villes du nord et du centre.

Vu que l'éclairage artificiel est supposé indépendant de l'éclairement naturel, la consommation d'électricité liée à ce poste ne change pas avec le climat.

- La consommation d'électricité pour les équipements de bureautique constitue une part significative du bilan énergétique. Cette consommation est d'ailleurs plus importante que le besoin de rafraîchissement pour les zones climatiques du nord.

Vu que nous avons sélectionné des équipements performants pour cet usage, réaliser des économies d'énergie par rapport aux valeurs actuelles sera très difficile.

- La consommation d'électricité pour les auxiliaires de ventilation est marginale par rapport aux autres postes.

3.1.7.5 Climats retenus

Compte tenu des données météorologiques et des résultats des simulations, les zones climatiques peuvent être classées en trois catégories :

- Climats froids : Trappes, Nancy, Rennes et Mâcon.

Ces climats sont caractérisés par des besoins de chauffage importants qui constituent la plus grande partie du besoin énergétique global. Ensuite vient la consommation d'électricité pour l'éclairage suivie par celle pour les appareils de bureautique. Les besoins de rafraîchissement restent marginaux par rapport aux autres besoins.

Des économies d'énergie peuvent être réalisées grâce à une attention portée à l'isolation thermique du bâtiment et à la réduction des déperditions par ventilation, mais également grâce à un éclairage plus efficace. Le confort thermique d'été semble pouvoir être assuré via des solutions passives. Par ailleurs, avec un système de refroidissement à haute efficacité, la consommation d'énergie pour le rafraîchissement sera de l'ordre des consommations des auxiliaires du système de ventilation mécanique.

- Climats modérés : La Rochelle et Agen.

Comparées à la première catégorie, ce climat présente des besoins de chauffage inférieur de 35% et des besoins de rafraîchissement plus importants, mais qui restent cependant limités par rapport au chauffage. La consommation d'électricité pour l'éclairage vient au deuxième rang. Le besoin de rafraîchissement et la consommation d'électricité pour les appareils de bureautique sont du même niveau.

Des économies d'énergie peuvent également être réalisées grâce à une attention portée à l'isolation thermique du bâtiment, à la réduction des déperditions par ventilation et à un éclairage plus efficace. Les besoins de rafraîchissement peuvent être assurés via des solutions passives, associées si nécessaire à des systèmes actifs.

- Climats chauds : Carpentras et Nice.

La principale caractéristique de ces climats, est un besoin de rafraîchissement qui occupe une part importante du bilan énergétique global. Ce besoin est par ailleurs du même niveau que les consommations d'électricité pour l'éclairage.

Comme pour les autres climats, des économies d'énergie peuvent être réalisées grâce à une attention sur l'isolation thermique, la réduction des déperditions par ventilation et un éclairage plus efficace. Vu le niveau des besoins de rafraîchissement, il nous semble cependant nécessaire d'intégrer des systèmes actifs de refroidissement afin d'assurer le confort thermique d'été.

On constate que certaines zones climatiques se ressemblent de point de vue des besoins énergétiques, tant au niveau du type (chaud / froid) que des valeurs. Nous avons donc décidé de ne retenir, pour la suite de ce travail, qu'un climat par catégorie. Les climats sélectionnés représentent les extrêmes et la moyenne en terme de besoins de chauffage et de rafraîchissement, à savoir: Nancy, Agen et Nice.

3.1.7.6 Performances énergétiques et émission de CO₂

Il s'agit d'évaluer les performances du bâtiment avec son installation de climatisation, en termes de consommation d'énergie finale et primaire et d'émission de CO₂. Les températures de consigne pour le chauffage et le rafraîchissement sont identiques à celles utilisées précédemment (voir Tableau 3.10).

Nous rappelons que l'installation de climatisation consiste en une pompe à chaleur réversible air - eau sur l'air extérieur et des unités terminales de type ventilo-convecteurs 2 tubes – 2 fils. Le dimensionnement de la pompe à chaleur et des ventilo-convecteurs est effectué à l'aide des puissances maximales de chauffage et de rafraîchissement obtenues lors de l'évaluation des besoins énergétiques du bâtiment (voir §3.1.7.4).

Le dimensionnement est effectué en considérant la valeur maximale entre les puissances maximales de chauffage et de rafraîchissement. Les caractéristiques retenues pour l'installation de climatisation sont présentées dans l'annexe A1.

Performances de l'installation de climatisation : La Figure 3.20 montre la variation du coefficient de performance annuel en mode chaud et froid (COP et EER) de la pompe à chaleur pour les trois zones climatiques retenues. Ces coefficients intègrent la consommation d'électricité de la pompe à chaleur pour le contrôle et les ventilateurs.

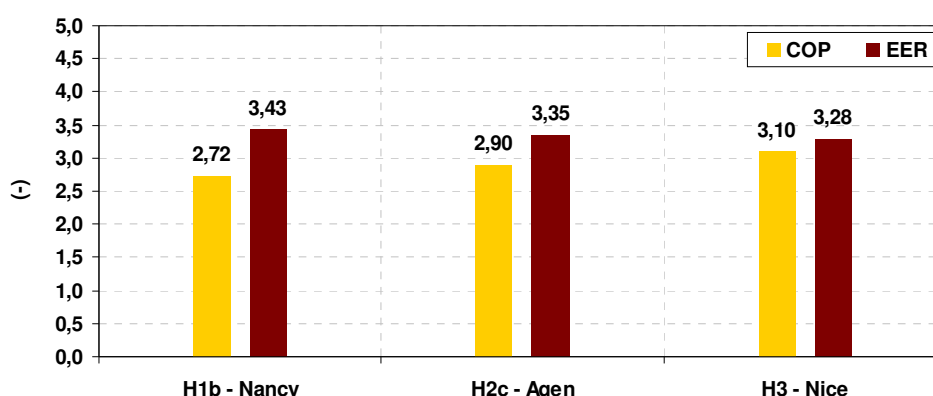


Figure 3.20 : COP et EER annuels de la pompe à chaleur pour les climats étudiés

De plus, nous avons évalué pour l'installation de climatisation, le coefficient de performance global COP_g et l'efficacité globale de l'installation de rafraîchissement EER_g.

On entend par coefficient de performance global et efficacité globale, le ratio entre les besoins annuels de chauffage ou de rafraîchissement du bâtiment et la consommation d'énergie finale totale annuelle correspondante du système de climatisation (pompe à chaleur, pompe de circulation, ventilateurs, appoint électrique,...). Ces deux coefficients vont servir pour les travaux d'optimisation énergétique de la configuration de référence dans les chapitres 4 et 5.

La Figure 3.23 montre les coefficients COP_g et EER_g de l'installation de climatisation pour les trois zones climatiques.

Il est à noter que les valeurs de ces coefficients peuvent être augmentées en optimisant le dimensionnement de l'installation de climatisation. En effet, à cause de la relance, les puissances maximales requises pour le chauffage sont souvent plus importantes que celle pour le rafraîchissement, pour les trois villes. Le dimensionnement a été donc effectué par rapport aux puissances de chauffage, ce qui fait que l'installation de climatisation est surdimensionnée pour le rafraîchissement.

Le surdimensionnement de la pompe à chaleur peut être constaté en comparant pour les trois villes, le ratio de la puissance requise pour le rafraîchissement du bâtiment sur la puissance nominale de la pompe à chaleur (voir Figure 3.22). En effet, il est facile de remarquer que les puissances de rafraîchissement restent toujours inférieures à la puissance nominale pour les trois villes. En passant de Nancy, à Agen et puis à Nice, ces puissances s'approchent de la puissance nominale ce qui explique le fait que le coefficient EER_g augmente.

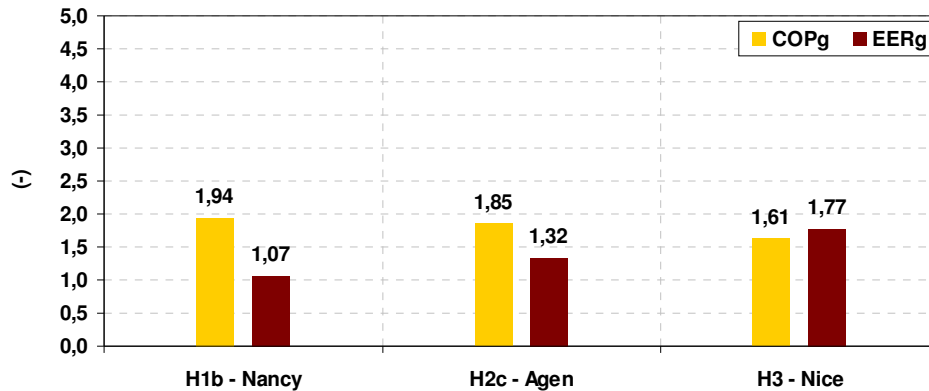


Figure 3.21 : Coefficients COP_g et EER_g du système de climatisation pour les climats étudiés

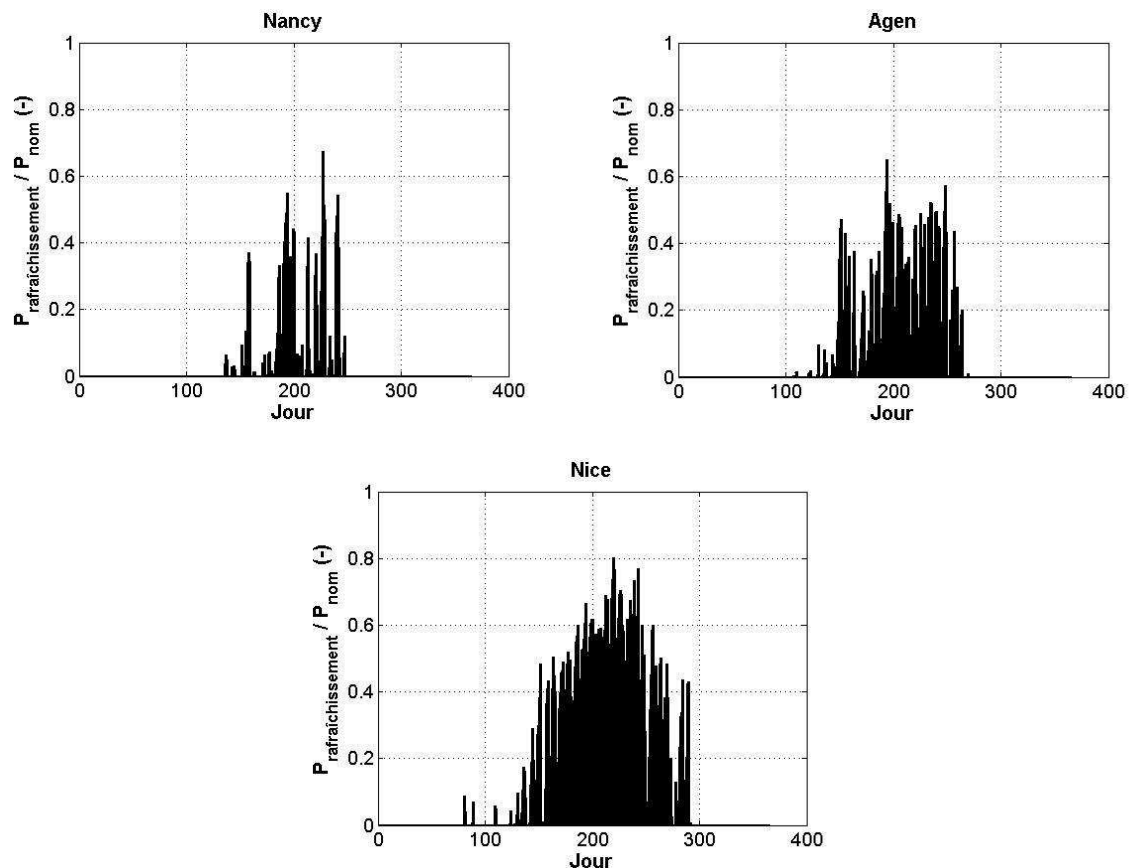


Figure 3.22 : Ratio entre la puissance requise pour le rafraîchissement du bâtiment et la puissance nominale de la pompe à chaleur pour les climats étudiés

Consommation d'énergie : La Figure 3.23 illustre la consommation annuelle d'énergie finale par poste en kWh/m².an.

Le poste chauffage regroupe les consommations d'électricité, pour le mode chaud, de la pompe à chaleur avec ses auxiliaires, des ventilo-convecteurs (résistances électriques et

ventilateurs) et de la pompe de circulation du circuit hydraulique. Le poste rafraîchissement comprend les consommations d'électricité pour le mode froid, des mêmes composants.

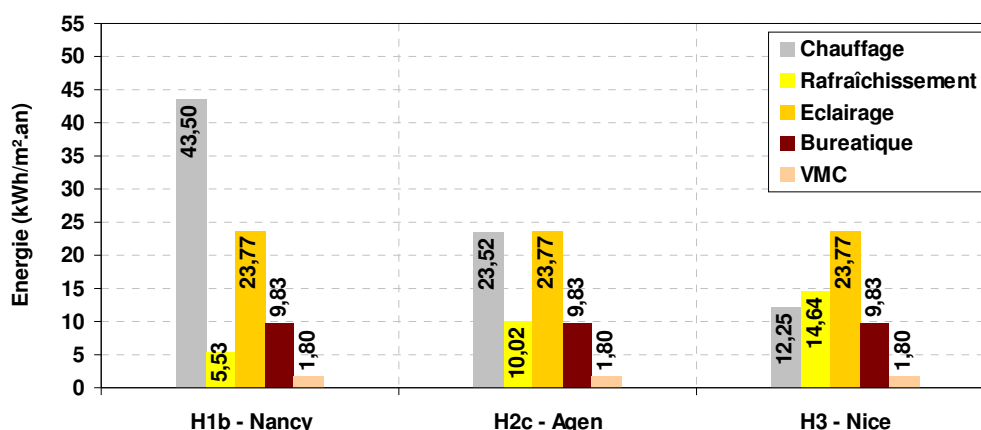


Figure 3.23 : Consommation annuelle d'énergie finale par poste pour les climats étudiés

Nous remarquons la part importante de la consommation d'électricité liée à l'éclairage dans le bilan global. Cette consommation constitue le poste le plus consommateur pour Nice et occupe la deuxième place pour Nancy et Agen. Ceci prouve que l'éclairage artificiel est incontournable pour réaliser des économies d'énergie.

La Figure 3.24 montre la consommation annuelle du bâtiment en énergie finale et primaire pour les trois zones climatiques. Le facteur de conversion de l'énergie finale en énergie primaire est de 2,58 pour l'électricité (Réglementation thermique, 2005). C'est à Nancy que l'on obtient les consommations d'énergie les plus élevées. Ceci est lié en grande partie à une consommation d'énergie importante pour le chauffage. La consommation minimale est obtenue à Nice suite à une consommation d'énergie pour le chauffage réduite par rapport aux autres climats et à une consommation d'énergie pour le rafraîchissement modérée.

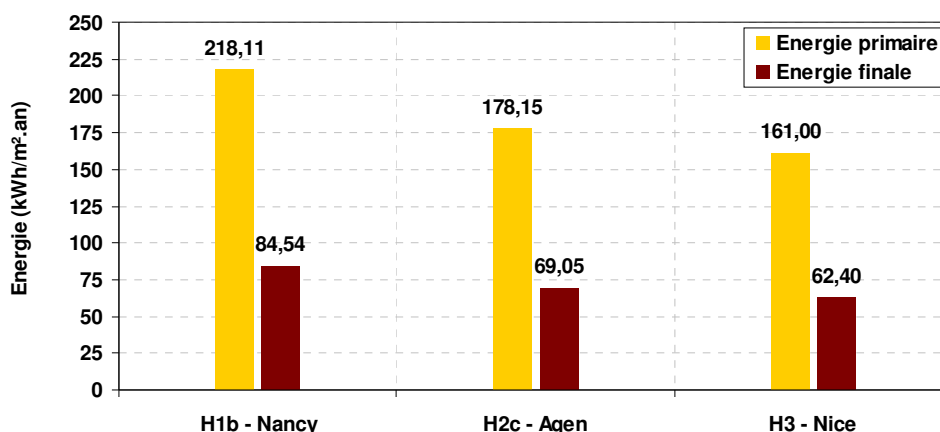


Figure 3.24 : Consommations annuelles d'énergie finale et primaire du bâtiment pour les climats étudiés

Emission de CO₂ : Les émissions de CO₂ varient de manière proportionnelle aux consommations d'énergie (voir Figure 3.25). Ces émissions ont été déterminées à l'aide de la méthode bilan carbone de l'ADEME (ADEME, 2005b).

Cette méthode définit des facteurs de conversion entre une consommation d'énergie primaire et l'émission de CO₂ correspondante (voir Tableau 3.12).

Usages	Indicateurs
Chauffage + Pompe de circulation	180
Eclairage tertiaire	100
Rafraîchissement	40
Appareils de bureautique, VMC	60

Tableau 3.12 : Indicateurs de contenu en CO₂ de l'électricité consommée en France en g de CO₂/kWh (ADEME, 2005b)

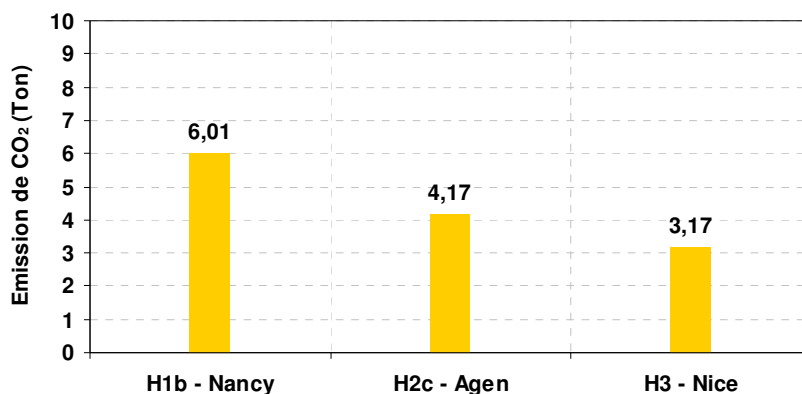


Figure 3.25 : Emission totale de CO₂ du bâtiment pour les climats étudiés

A l'instar des consommations d'énergie, les émissions maximales et minimales de CO₂ sont obtenues à Nancy et Nice respectivement.

3.2 Description de la méthode des plans d'expériences

3.2.1 Introduction

La méthode des plans d'expériences n'est pas une technique nouvelle. Elle a débuté avec les travaux de Fisher en 1925. Les premiers utilisateurs de ces méthodes furent les agronomes qui ont vite compris l'intérêt des plans d'expériences et notamment la réduction du nombre d'essais lorsqu'on étudie de nombreux paramètres. Mais cette technique est restée relativement confidentielle et n'a pas réussi à pénétrer de façon significative le secteur industriel avant les années soixante-dix.

Ainsi, autrefois confidentielle, cette méthode connaît aujourd'hui un développement important. La précision des résultats obtenus, la pertinence des informations apportées par cette méthode contribuent à son développement actuel dans tous les secteurs d'activités.

Les plans d'expériences sont utiles à toutes personnes qui entreprennent des recherches scientifiques ou des études industrielles. Ils sont applicables à partir du moment où l'on recherche le lien qu'il existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i , qui peuvent influencer la valeur de y . Ce lien se traduit en général par un polynôme de la forme $y = f(x_i)$ (voir Figure 3.26).

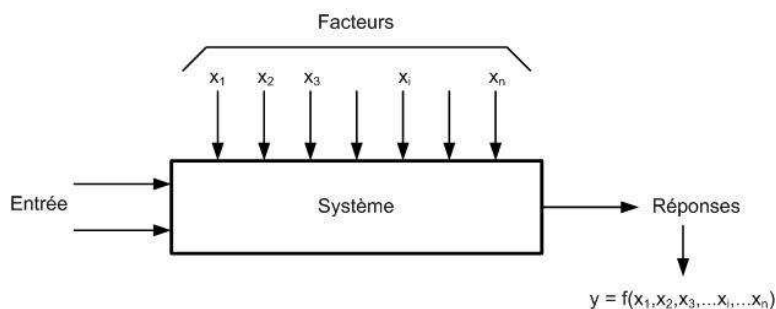


Figure 3.26 : L'environnement du système

En fait, on est parfois amené à comprendre comment réagit un système en fonction des différents facteurs qui sont susceptibles de le modifier. Pour analyser l'évolution du processus, on mesure une réponse, et, à partir de différents essais, on va tenter d'établir des relations de cause à effet entre la (ou les) réponse(s) et les différents facteurs. Il n'est pas facile de définir de telles relations entre les réponses et les facteurs, surtout s'il existe des interactions entre les facteurs. Les plans d'expériences permettent d'apporter une réponse tout en minimisant le nombre d'expériences avec une bonne précision du résultat.

Dans cette partie, nous indiquerons les principes fondamentaux de cette science et nous passerons en revue les plans d'expériences les plus couramment utilisés et qui sont potentiellement applicables en physique du bâtiment.

Il est à noter que Filfli (2007) a mis en œuvre la méthode des plans d'expériences pour une étude d'optimisation énergétique des bâtiments. Ce travail a consisté à développer des modèles polynômiaux à l'aide des tables de Taguchi que nous allons présenter par la suite, pour optimiser le couplage bâtiment – systèmes du génie climatique. L'objectif était de réduire les consommations d'énergie dues à la climatisation des bâtiments tertiaires. Ce travail a montré l'efficacité de la méthode des plans d'expériences pour simplifier les études paramétriques, tout en gardant une bonne précision sur les résultats.

3.2.2 Terminologie

Avant d'aborder l'étude des plans d'expériences, il convient de préciser le vocabulaire que nous allons utiliser.

Facteurs : Les facteurs sont les causes possibles, élémentaires, des variations observées sur la réponse. Ils peuvent être de deux natures différentes : qualitative comme le type de système de climatisation, ou quantitative comme l'efficacité de ce système. On peut représenter un facteur par un axe gradué et orienté (voir Figure 3.27). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsque l'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes : la borne inférieure (niveau bas) et la borne supérieure (niveau haut). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur, ou plus simplement, le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1. Ce type de notation s'appelle « notation de Yates » et sera développé en détail par la suite.

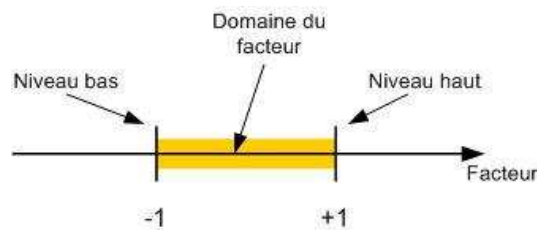


Figure 3.27 : Domaine de variation d'un facteur

Espace expérimental : Si un autre facteur est pris en considération, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation.

Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (voir Figure 3.28).

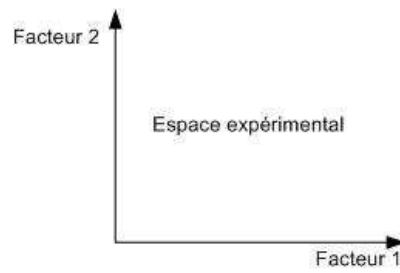


Figure 3.28 : Définition de l'espace expérimental

Point expérimental : Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (voir Figure 3.29). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points d'expériences.

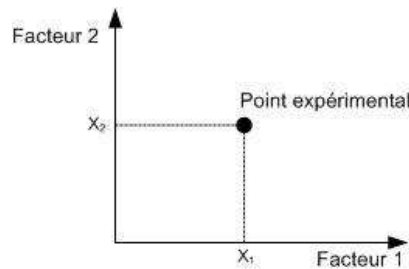


Figure 3.29 : Niveaux des facteurs définissant des points d'expériences dans l'espace expérimental

Domaine d'étude : La réunion des domaines de chaque facteur définit le domaine d'étude. Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien défini, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (voir Figure 3.30).

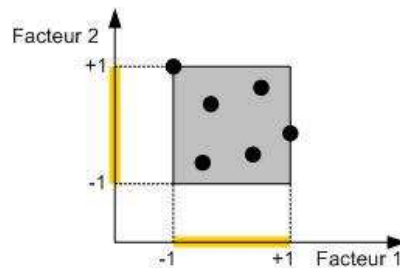


Figure 3.30 : Définition du domaine d'étude

Coordonnées centrées réduites : Lorsque l'on attribue la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur +1 au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- On change l'unité de mesure. Par exemple, si le niveau bas d'un facteur est 10 °C et le niveau haut 30 °C, il y a 20 °C entre ces deux valeurs, soit 20 fois l'unité de température. Entre -1 et +1, il y apparaît deux nouvelles valeurs. La nouvelle unité vaut 10 °C, on lui donne le nom de pas. Le pas est la variation entre la position moyenne de la variable et une extrémité du domaine.
- On déplace l'origine des mesures. Dans l'exemple choisi, le milieu de l'intervalle [-1 +1] correspond à une température de 20 °C. La nouvelle origine, notée zéro, diffère donc de l'origine exprimée en unité courante.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites: centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité. Le passage des variables d'origine A aux variables centrées

réduites X , et inversement, est donné par l'équation (3.1) (A_0 étant la valeur centrale en unité courante) :

$$X = \frac{A - A_0}{\text{pas}} \quad (3.1)$$

L'intérêt des variables centrées réduites est de pouvoir présenter les plans d'expériences de manière adimensionnelle quels que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs. La théorie des plans d'expériences présente ainsi une grande généralité.

Surface de réponse : À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses positionnées sur une surface appelée la surface de réponse (voir Figure 3.31).

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche le minimum d'expériences tout en conservant la meilleure précision possible sur la surface de réponse.

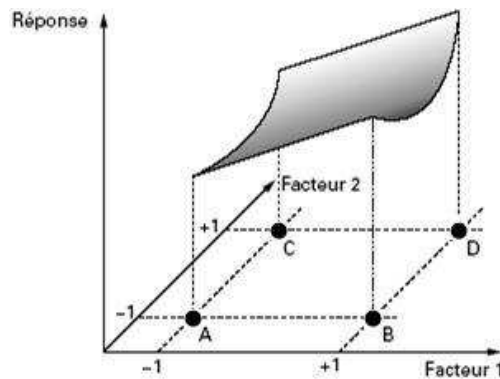


Figure 3.31 : Surface de réponse pour un plan à deux facteurs

La fonction qui lie la réponse Y aux facteurs X_i , est représentée par un modèle mathématique dont la formulation la plus générale est la suivante :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (3.2)$$

3.2.3 Modélisation mathématique

Il existe plusieurs types de modèles mathématique. Les principaux rencontrés pour les plans d'expériences sont des modèles matriciels (Pillet 1999, Souvay 2002, Vigier 1988) et des modèles polynômiaux (Goupy 1999).

L'avantage de la modélisation polynômiale par rapport à la modélisation matricielle est la facilité de détermination du modèle. C'est ce type de modélisation qui est le plus utilisé par les expérimentateurs (Goupy 2000) et que l'on adoptera dans cette étude.

3.2.4 Modélisation matricielle

Dans le cas d'une modélisation matricielle, les niveaux respectifs d'un facteur à trois niveaux seront notés par 1, 2 et 3, au lieu de -1, 0 et +1 pour une modélisation polynômiale. Pour un facteur à quatre niveaux, la notation sera également 1, 2, 3 et 4.

Considérons l'exemple d'un plan de 2 facteurs A et B, ayant respectivement 2 et 3 niveaux. Le modèle mathématique recherché est de type : $Y = M + A + B + AB$. L'objectif est donc de modéliser les effets des facteurs A et B, et leur interaction AB. M est la moyenne générale

des réponses, appelée souvent la moyenne. La modélisation matricielle de ce modèle s'écrira :

$$Y = M + [E_{A1} \quad E_{A2}] \cdot [A] + [E_{B1} \quad E_{B2} \quad E_{B3}] \cdot [B] + [A]^t \cdot \begin{bmatrix} I_{A1B1} & I_{A1B2} & I_{A1B3} \\ I_{A2B1} & I_{A2B2} & I_{A2B3} \end{bmatrix} \cdot [B] \quad (3.3)$$

$[A]$ et $[B]$ sont des vecteurs de dimensions égales au nombre de niveaux des facteurs correspondants. A titre d'exemple, si le facteur A est au niveau 1, alors $[A]$ sera égal à $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$.

De plus, si le facteur B est au niveau 3 alors $[B]$ sera égal à $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$.

E_{Ai} est l'effet de A au niveau i. Il est défini à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{Ai} = \text{Moyenne des réponses lorsque A est au niveau i} - M \quad (3.4)$$

I_{AiBj} représente l'interaction entre A et B, lorsque le facteur A se trouve au niveau i et le facteur B au niveau j.

$$I_{AiBj} = \text{Moyenne des réponses lorsque } (A = i, B = j) - M - E_{Ai} - E_{Bj} \quad (3.5)$$

En général, pour un facteur A à n niveaux on peut écrire :

$$\sum_{i=1}^n E_{Ai} = 0 \quad (3.6)$$

Le calcul des effets d'un facteur à deux niveaux ne possède qu'un seul degré de liberté. Il s'agit d'une seule valeur indépendante, la seconde se déduit de la première. D'une manière générale, le nombre de degré de liberté d'un facteur A, noté $ddl(A)$, se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$ddl(A) = niv(A) - 1 \quad (3.7)$$

$niv(A)$ étant le nombre de niveau de A.

Le nombre de degrés de liberté d'une interaction est égal au produit des degrés de liberté de chacun des deux facteurs.

$$ddl(AB) = ddl(A) \times ddl(B) \quad (3.8)$$

3.2.5 Modélisation polynômiale

La réponse peut être modélisée via un modèle polynômial faisant intervenir des coefficients constants et les niveaux des facteurs. Les modèles polynômiaux conventionnels pour les plans d'expériences sont du premier ou du second degré. Ils font intervenir quatre termes : le terme constant a_0 , les termes du premier degré x_i , les termes rectangles $x_i x_j$ et les termes carrés x_i^2 pour les modèles de second degré.

Le modèle de premier degré est exprimé comme suit :

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i X_i + \sum_{i,j}^{\frac{n-1}{2}} a_{ij} X_i X_j \quad (3.9)$$

Avec,

- a_0 valeur de la réponse au centre du domaine d'étude, appelée souvent la moyenne
- a_i effet du facteur i
- a_{ij} interaction entre les facteurs i et j

Ces coefficients ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le modèle de second degré est utilisé dans le cas de facteurs à plus de 2 niveaux. Il est exprimé à l'aide de l'équation suivante :

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i X_i + \sum_{i,j}^{\frac{n-1}{2}} a_{ij} X_i X_j + \sum_i^n a_{ii} X_i^2 \quad (3.10)$$

Les équations (3.9) et (3.10) représentent en fait, le développement limité de Taylor de la fonction $Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ autour du centre du domaine d'étude.

Le développement de Taylor pour une fonction $f(x_1, \dots, x_n)$, différentiable au point $(b_1, \dots, b_n)$, s'écrit :

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{j!} \left[\sum_{k=1}^n (x_k - b_k) \frac{\partial}{\partial x'_k} \right]^j f(x'_1, \dots, x'_n) \right\}_{x'_k = b_k} \quad (3.11)$$

Introduisons le terme Δ_k qui représente l'intervalle de variation de x_k autour du point $(b_1, \dots, b_n)$ le long de l'axe de coordonnées k , l'équation (3.11) devient :

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{j!} \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{x_k - b_k}{\frac{\Delta_k}{2}} \right) \cdot \frac{\Delta_k}{2} \frac{\partial}{\partial x'_k} \right]^j f(x'_1, \dots, x'_n) \right\}_{x'_k = b_k} \quad (3.12)$$

A titre d'exemple, le développement de Taylor pour une fonction $f(x_1, x_2)$, dérivable au point (b_1, b_2) , s'écrit :

$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2) &= \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{j!} \left[\left(\frac{x_1 - b_1}{\frac{\Delta_1}{2}} \right) \cdot \frac{\Delta_1}{2} \frac{\partial}{\partial x'_1} + \left(\frac{x_2 - b_2}{\frac{\Delta_2}{2}} \right) \cdot \frac{\Delta_2}{2} \frac{\partial}{\partial x'_2} \right]^j f(x'_1, \dots, x'_n) \right\}_{x'_k = b_k} \\
 &= f(b_1, b_2) + \left(\frac{\Delta_1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{(b_1, b_2)} \right) \cdot \left(\frac{x_1 - b_1}{\frac{\Delta_1}{2}} \right) + \left(\frac{\Delta_2}{2} \frac{\partial f}{\partial x_2} \Big|_{(b_1, b_2)} \right) \cdot \left(\frac{x_2 - b_2}{\frac{\Delta_2}{2}} \right) \\
 &\quad + \left(\frac{\Delta_1}{2} \frac{\Delta_2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \Big|_{(b_1, b_2)} \right) \cdot \left(\frac{x_1 - b_1}{\frac{\Delta_1}{2}} \right) \left(\frac{x_2 - b_2}{\frac{\Delta_2}{2}} \right) \\
 &\quad + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\Delta_1}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} \Big|_{(b_1, b_2)} \right) \cdot \left(\frac{x_1 - b_1}{\frac{\Delta_1}{2}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\Delta_2}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} \Big|_{(b_1, b_2)} \right) \cdot \left(\frac{x_2 - b_2}{\frac{\Delta_2}{2}} \right)^2 + \dots
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Soit X_i , la variable centrée réduite de x_i sur l'intervalle $[b_i - \Delta_i/2; b_i + \Delta_i/2]$. X_i est calculé de la manière suivante :

$$X_i = \frac{x_i - b_i}{\frac{\Delta_i}{2}} \tag{3.14}$$

Les coefficients a_i , a_{ij} , a_{ii} des équations (3.9) et (3.10) peuvent être déterminés par identification, en développant l'équation (3.12). On obtient ainsi :

$$\begin{cases}
 a_i = \frac{\Delta_i}{2} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{(b_1, \dots, b_n)} \right) \\
 a_{ij} = \frac{\Delta_i}{2} \frac{\Delta_j}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{(b_1, \dots, b_n)} \right) \\
 a_{ii} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_i}{2} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \Big|_{(b_1, \dots, b_n)} \right)
 \end{cases} \tag{3.15}$$

La méthode de calcul des coefficients inconnus du modèle polynômial sera décrite par la suite.

3.2.6 Modèle de l'expérimentateur

Deux compléments doivent être apportés au modèle mathématique :

- Le premier est le manque d'ajustement. Cette expression traduit le fait que le modèle choisi par l'expérimentateur avant les essais est probablement un peu différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque ou écart d'ajustement (lack of fit).
- Le second est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse dans certains domaines. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, il est possible qu'on n'obtienne pas exactement le même résultat. Il y a une dispersion des résultats. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs aléatoires ou erreurs expérimentales.

La simulation numérique ne présente pas d'erreurs expérimentales. En effet, un point expérimental donne une valeur unique de la réponse.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, le résidu, noté « e ». Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n) + e \quad (3.16)$$

3.2.7 Système d'équations

Chaque point expérimental apporte une valeur de la réponse. Or, cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. À la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (pour n essais) à p inconnues (pour p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$[Y] = [X] \cdot [a] + [e] \quad (3.17)$$

Ce système ne peut pas, en général, être résolu simplement car le nombre d'équations est inférieur au nombre d'inconnues. En effet, il y a n équations et p + n inconnues. Cette résolution ne peut être menée à bien que si l'on utilise une méthode de régression multilinéaire qui introduit p équations supplémentaires.

L'objectif est de trouver un ensemble de p coefficients qui résout le mieux possible le système d'équations. On cherche le jeu de coefficients qui minimise la somme des carrés des écarts. C'est l'hypothèse des moindres carrés qui apporte les p équations dont on a besoin. Le système d'équations devient alors (Goupy, 2000) :

$$\begin{cases} [Y] = [X] \cdot [a] + [e] \\ \frac{\partial [e]^t [e]}{\partial [a]} = 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

Le résultat de ce calcul est :

$$[\hat{a}] = ([X]^t \cdot [X])^{-1} \cdot [X]^t \cdot [Y] \quad (3.19)$$

Le symbole « ^ » indique qu'il s'agit de coefficients obtenus en utilisant la méthode des moindres carrés.

Les coefficients ainsi obtenus sont utilisés pour écrire le modèle mathématique. Ce modèle permet de calculer la réponse dans tout le domaine d'étude :

$$[\hat{Y}] = [X] \cdot [\hat{a}] \quad (3.20)$$

Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- La matrice d'information $[X]^t[X]$
- La matrice de dispersion $([X]^t[X])^{-1}$

3.2.8 Précision sur les coefficients

L'erreur sur les coefficients du modèle, lorsque l'on a une estimation du résidu, est calculée à l'aide de l'équation suivante (Goupy, 2000):

$$\text{Diag}(V(\hat{a})) = \sigma_r^2 \cdot \text{Diag}([X]^t \cdot [X])^{-1} \quad (3.21)$$

C'est-à-dire que les variances des coefficients sont égales à la variance du résidu, σ_r^2 , multipliée par l'élément diagonal de la matrice de dispersion. Les variances des coefficients sont les termes diagonaux de la matrice $V(\hat{a})$. On obtient ces variances par identification.

L'équation (3.21) montre qu'il y a trois composants qui induisent des erreurs sur les coefficients :

- L'erreur commise sur les réponses à cause du terme σ_r . Ce terme regroupe l'erreur expérimentale et l'écart d'ajustement. Les erreurs commises sur les réponses mesurées se transmettent donc aux coefficients du modèle mathématique.
- L'emplacement des points d'expériences. La position des points d'expériences dans le domaine d'étude génère des erreurs plus ou moins élevées sur les coefficients du modèle mathématique. Le responsable de cette erreur est la matrice $[X]$.
- Le modèle mathématique choisi a priori. Le choix initial du modèle mathématique engendre des écarts d'ajustement plus ou moins élevés sur les coefficients du modèle mathématique. Les responsables de cette erreur sont σ_r et $[X]$.

3.2.9 Précision sur les réponses prédites

Les modèles polynômiaux, dont les coefficients ont été calculés à l'aide de la méthode des moindres carrés, permet de calculer les réponses pour tous les points du domaine d'étude, même si aucune expérience n'y a été réalisée. Soit un point p du domaine d'étude, défini par ses coordonnées, la réponse prédite en ce point est donnée par :

$$y_p = [x_p]^t [\hat{a}] \quad (3.22)$$

Où, y_p est la réponse calculée (ou réponse prédite) au point p , $[x_p]^t$ est la matrice $[X]$ au point p .

Il a été montrée que (Goupy, 1999) :

$$\sigma(y_p) = \sigma_r \left([x_p]^t ([X]^t \cdot [X])^{-1} [x_p] \right)^{1/2} \quad (3.23)$$

L'équation (3.23) permet de calculer l'incertitude sur la réponse calculée au point p . Elle indique que cette incertitude dépend de quatre grandeurs :

- L'erreur expérimentale sur les réponses mesurées représentée par le terme σ_r qui regroupe l'erreur expérimentale et l'écart d'ajustement.
- La position du point p dans le domaine d'étude, représentée par la matrice $[x_p]$
- L'emplacement des points d'expériences dans le domaine d'étude représenté par la matrice $[X]$.
- Le modèle mathématique choisi a priori, représenté par le terme σ_r et la matrice $[X]$.

3.2.10 Critères d'optimalité

Suivant les objectifs de l'étude, les meilleurs emplacements des points d'expériences dans le domaine d'étude ne sont pas les mêmes. En effet, la disposition optimale des points d'expériences dépend de plusieurs choix effectués par l'expérimentateur, choix qui sont eux-mêmes fonction des caractéristiques de l'étude et des objectifs à atteindre. Ces choix dépendent d'abord du domaine d'étude et du modèle a priori retenus par l'expérimentateur. Ils dépendent ensuite d'un critère d'optimalité.

Les principaux critères d'optimalité sont les suivants (Goupy, 1999) :

- **Critère de presque orthogonalité** : Si la sous-matrice obtenue en retirant la première ligne et la première colonne de la matrice $([X]^t[X])^{-1}$ est diagonale, le critère de presque orthogonalité est respecté.
- **Critère de D-optimalité** : Si l'on veut la plus petite variance possible sur l'ensemble des coefficients, il faut que les termes diagonaux de la matrice de dispersion soient eux-mêmes les plus petits possibles. On obtient ce résultat en maximisant le déterminant de la matrice $[X]^t[X]$. Le critère correspondant s'appelle le critère de D-optimalité.
- **Critère de A-optimalité** : La somme des variances des coefficients peut être minimisée. Dans ce cas, on parle de critère de A-optimalité. Un plan est A-optimal si la position des points d'expériences minimise la trace de la matrice $([X]^t[X])^{-1}$.
- **Critère de G-optimalité** : Les différents éléments de la diagonale principale de la matrice $([X]^t[X])^{-1}$ ne sont pas tous égaux entre eux. Les coefficients du modèle sont donc entachés d'erreurs plus ou moins fortes. Il peut y avoir un déséquilibre entre ces erreurs. Le critère de G-optimalité cherche à diminuer la valeur de la plus grande variance pour qu'elle soit la plus faible possible.
- **Critère de O-optimalité** : La matrice de calcul X est une matrice orthogonale d'Hadamard¹. Il en résulte que la matrice $([X]^t[X])^{-1}$ est une matrice diagonale. Seuls les termes diagonaux de cette matrice sont différents de zéro. Ces termes diagonaux sont positifs et minimaux. La variance des coefficients est donc la plus faible possible.

Tous les critères précédents sont simultanément respectés si la matrice d'expérience est orthogonale.

- **Critère d'isovariance par rotation** : On désire que les réponses calculées avec le modèle issu du plan d'expériences aient une erreur de prévision identique pour des points situés à la même distance du centre du domaine d'étude. Dans ce cas on parle de plan isovariant par rotation

3.2.11 Plans factoriels complets

Ce type de plan est utilisé en général pour une modélisation du premier degré. Un plan factoriel complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience. On note ce plan X^K ce qui signifie que cette expérimentation concerne un système comportant K facteurs à X niveaux.

Le nombre d'expériences nécessaire pour l'ensemble des combinaisons est assez facile à calculer. Pour 2 facteurs à 2 niveaux, le nombre de combinaisons possibles comporte $2 \times 2 = 2^2 = 4$ configurations. Le plan complet utilise 4 expériences. De même, pour 6 facteurs à 3 niveaux, le plan complet comporte : $3^6 = 729$ expériences.

Dans le cas d'un plan comportant des facteurs associés à différents niveaux, le calcul du nombre d'expériences du plan complet est similaire. Par exemple, pour 3 facteurs à 2 niveaux et 2 facteurs à 4 niveaux, le plan complet comporte $2^3 \times 4^2 = 128$ expériences.

¹ Les matrices d'Hadamard sont des matrices carrées $H_n=(h_{ij})$ telles que $tr(H_n).H_n = n.I_n$, avec n dimensions de la matrice H_n , I_n la matrice unité de dimension n . Ces matrices existent pour $n = 2$ et pour toute valeur de n multiple de 4. Parmi les propriétés des matrices d'Hadamard, on note l'orthogonalité des colonnes (ou des lignes) entre elles.

Choix des expériences : Pour choisir les points d'expérimentation, la méthode des plans d'expériences consiste à prendre les points de mesure aux extrémités du domaine expérimental. Dans le cas d'un plan factoriel complet 2^3 par exemple, les points de mesure seront les huit sommets d'un cube (voir Figure 3.32).

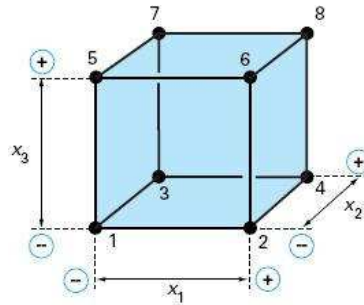


Figure 3.32 : Stratégies d'expérimentation pour un plan factoriel complet (2^3)

Choix du nombre de niveaux : Le choix de prendre deux niveaux d'étude pour chaque facteur sous entend une linéarité de la réponse entre ces deux niveaux. Les mini et maxi choisis (appelés niveaux -1 et +1) sont l'objet d'un compromis intégrant deux facteurs:

- Si les niveaux sont trop proches l'un de l'autre, on risque de ne pas mettre en évidence l'effet des facteurs.
- Si les niveaux sont trop éloignés l'hypothèse de linéarité peut être mise en défaut (voir Figure 3.33)

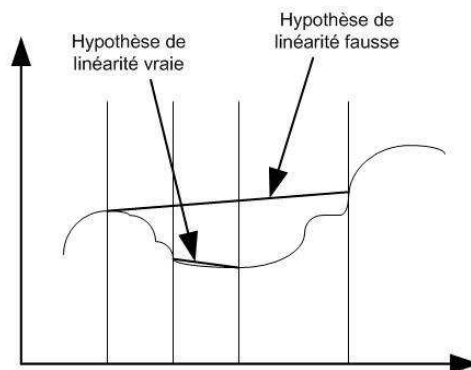


Figure 3.33 : Choix des niveaux des facteurs

Calcul des coefficients du modèle polynômial : considérons le plan complet de 3 facteurs à 2 niveaux (2^3) présenté dans le Tableau 3.13.

N° de l'essai	Facteur A	Facteur B	Facteur C	Réponse
1	-1	-1	-1	44
2	-1	-1	+1	47
3	-1	+1	-1	54
4	-1	+1	+1	56
5	+1	-1	-1	58
6	+1	-1	+1	60
7	+1	+1	-1	80
8	+1	+1	+1	81

Tableau 3.13 : Plan complet 2^3

Le modèle mathématique recherché est du type : $Y \sim M + A + B + C + AB + AC + BC + ABC$, M étant la moyenne. Sous forme polynômiale, le modèle s'écrit de la manière suivante :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{123}X_1X_2X_3 + e \quad (3.24)$$

La matrice de calcul des coefficients $[X]$, est obtenue à partir de la matrice d'expériences (voir Tableau 3.13). La première colonne correspond à la moyenne générale dont tout les éléments sont toujours pris égaux à +1. Les colonnes A, B et C sont les mêmes que celles que l'on trouve dans la matrice d'expériences. Les colonnes des interactions sont obtenues en multipliant les colonnes des facteurs correspondants, en appliquant les règles de multiplication suivantes :

$$\begin{aligned} (+1) \times (+1) &= +1 \\ (+1) \times (-1) &= -1 \\ (-1) \times (-1) &= +1 \end{aligned} \quad (3.25)$$

L'équation (3.24) s'écrit sous forme matricielle :

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{M} \quad \text{A} \quad \text{B} \quad \text{C} \quad \text{AB} \quad \text{AC} \quad \text{BC} \quad \text{ABC} \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \end{array} \\ \begin{bmatrix} 44 \\ 47 \\ 54 \\ 56 \\ 58 \\ 60 \\ 80 \\ 81 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{23} \\ a_{123} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \end{bmatrix} \end{array} \quad (3.26)$$

$[Y] \qquad \qquad \qquad [X] \qquad \qquad \qquad [a] \qquad [e]$

Les coefficients du polynôme sont ensuite déterminés à l'aide de l'hypothèse des moindres carrés (voir équation (3.19)) :

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \hat{a}_3 \\ \hat{a}_{12} \\ \hat{a}_{13} \\ \hat{a}_{23} \\ \hat{a}_{123} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 60 \\ 9,75 \\ 7,75 \\ 1 \\ 3 \\ -0,25 \\ -0,25 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Le modèle mathématique devient ainsi :

$$\hat{Y} = 60 + 9,75X_1 + 7,75X_2 + X_3 + 3X_1X_2 - 0,25X_1X_3 - 0,25X_2X_3 \quad (3.28)$$

3.2.12 Plans factoriels fractionnaire

Dans le cas d'un plan factoriel complet, chaque nœud de maillage donne lieu à un essai. Dans ce type de plan d'expériences, toutes les interactions peuvent être calculées, ce sont des plans sans risque pour l'expérimentateur. Cependant, on remarque que, lorsque le nombre de facteurs ou le nombre de niveaux pris par les facteurs augmente, ces plans nécessitent très vite un nombre très élevé d'essais. Ce souci a amené de nombreux scientifiques à la mise au point de plans « fractionnaires » du plan complet qui permet de trouver les coefficients du modèle avec beaucoup moins d'essais que ce dernier. Ces plans sont, en général, basés sur un modèle mathématique du premier degré.

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs, mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire pour des facteurs à deux niveaux a 2 fois moins ou 4 fois

moins ou 2^q fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant. On note par 2^{K-q} ce type de plan.

À la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de n équations à p inconnues avec p plus grand que n . On ne sait pas résoudre un tel système. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les inconnues et on résout le système pour ces groupes d'inconnues. On appelle ces groupes d'inconnues des contrastes et on dit que les inconnues sont aliassées dans les contrastes.

La Figure 3.34 montre les essais retenus pour un plan factoriel fractionnaire 2^{3-1} (Goupy, 2000).

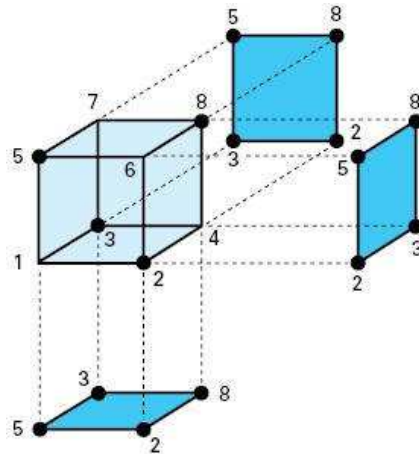


Figure 3.34 : Stratégies d'expérimentation pour un plan factoriel fractionnaire (2^{3-1})

En effet, pour étudier un modèle comportant par exemple trois facteurs à deux niveaux, mais pas d'interaction ($Y \sim M + A + B + C$), il faut identifier quatre coefficients (la moyenne et les trois effets). Il est donc nécessaire de réaliser quatre essais (autant d'équation que d'inconnues). Pourtant le plan complet comporte $2^3 = 8$ essais. On peut donc déterminer ce modèle en économisant quatre essais.

Cependant, le plan fractionnaire à quatre essais, ne permettra pas d'étudier les interactions (supposées nulles). Dans le cas où une interaction parmi les quatre possibles (AB, AC, BC, ABC) est non nulle, les coefficients du modèle seront perturbés par cette interaction. Ainsi l'utilisation n'est pas sans risque et demande une très bonne compréhension du système étudié.

Conditions à respecter : L'utilisation d'un plan fractionnaire nécessite le respect de deux conditions (Pillet, 1999) : conditions sur le nombre de degrés de liberté et conditions d'orthogonalité.

Le nombre de degrés de liberté d'un modèle indique le nombre de valeurs qu'il est nécessaire de calculer pour connaître l'ensemble des coefficients du modèle. Pour identifier une droite d'équation $Y = aX + b$, il faut au moins deux essais car il a deux coefficients à identifier (a et b).

Par exemple, si nous recherchons un plan fractionnaire permettant d'identifier le modèle suivant :

Y =	M + A + B + C + D + BC + CD						
Niveaux	2	2	2	2	4	4	
ddl	1	1	1	1	1	1	1

Le nombre de degrés de liberté du modèle est égal à 7. Il faudra donc que le plan retenu comporte au moins 7 expériences.

Fractionnement d'un plan : Considérons le plan complet 2^3 du Tableau 3.13. Nous avons vu qu'en fonction des états des facteurs, nous pouvons déduire l'état de l'interaction entre ces deux facteurs. Par convention, l'interaction sera à +1 lorsque les deux facteurs sont au même niveau. Elle sera à -1 lorsque les facteurs sont à des niveaux opposés. On retrouve ainsi l'état de chaque interaction pour les huit essais (voir Tableau 3.14).

N°	M	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
5	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
6	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
7	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Tableau 3.14 : Définition du plan complet 2^3

Pour obtenir un plan fractionnaire orthogonal de ce plan complet ; il faut couper ce plan en deux parties. Pour cela, il suffit de ne conserver que les -1 ou les +1 d'une colonne que l'on choisit. Cette colonne ne pourra évidemment pas être calculée. Elle restera à -1 ou +1 sur l'ensemble du plan d'expériences.

Il existe $2^3 - 1 = 7$ manières de couper en deux parties (autant qu'il y a de colonnes) (Pillet, 1999). Si nous négligeons les interactions du troisième ordre, nous pouvons couper le plan complet en ne prenant que les -1 ou les +1 de la colonne ABC. On obtient ainsi deux plans fractionnaires présentés dans le Tableau 3.15.

N°	M	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
4	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
6	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
7	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
5	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Tableau 3.15 : Définition de deux plans fractionnaires à partir d'un plan complet

Notion d'Alias : Considérons le demi-plan inférieur obtenu en ne conservant que les +1 de la colonne ABC (voir Tableau 3.15). Examinons les colonnes A et BC, les colonnes B et AC, ainsi que les colonnes C et AB. Ces colonnes sont deux à deux identiques. Nous appellerons A et BC, B et AC, C et AB des Alias.

Les actions A et BC sont des Alias. Cela signifie que lorsqu'on calcule les actions de l'un, ces actions sont confondues avec les actions de l'autre. En fait, on ne peut calculer que la somme des actions aliassées. Dans le cas des actions A et BC, lorsqu'on calcule les effets de A, en fait on calcule la somme de l'effet de A avec l'interaction BC. On dit aussi qu'il s'agit d'un contraste. Le contraste est la somme de l'effet de A et de l'interaction BC.

En considérant le demi plan inférieur, les colonnes A et BC, B et AC, C et AB se correspondent deux à deux, mais avec des signes opposés. Il s'agit, là aussi, d'actions aliassées. Cependant, le contraste dans ce cas est la somme de l'effet moins l'interaction.

Les alias sont l'un des éléments-clés des plans d'expériences fractionnaires. Le demi-plan coûtera deux fois moins cher que le plan complet, mais, ce gain sera payé par des ambiguïtés dans l'estimation de certains effets d'actions que l'on appelle des Alias.

Notion de résolution : On appelle action d'ordre I les facteurs (A, B, ...), actions d'ordre II les interactions de type AB, AC... et action d'ordre III les interactions de type ABC, ACD...

Dans le plan fractionnaire que nous venons d'étudier, un facteur (actions d'ordre I) est alias avec une interaction de type BC (action d'ordre II). Dans ce cas de figure, on dit que le plan est de résolution III (I + II). Ce type de plan est très risqué car si une interaction supposée nulle au départ est en fait non nulle, elle s'ajoute à l'effet d'un facteur.

Les plans de résolution IV sont plus intéressants. Les facteurs (ordre I) sont alias avec des actions d'ordre III (I + III = IV). Par contre les actions d'ordre II sont alias avec d'autres actions d'ordre II (II + II = IV). Ces plans sont très intéressants car, comme les actions d'ordre III sont souvent insignifiantes, les facteurs principaux sont déterminés sans ambiguïté.

Les plans de résolution V sont idéaux, mais souvent peu fractionnaires donc coûteux à réaliser. Les facteurs (ordre I) sont alias avec des actions d'ordre IV (I + IV = V). Les actions d'ordre II sont alias avec d'autres interactions d'ordre III (II + III = V). Ces plans permettent de déterminer sans ambiguïté tous les facteurs principaux et toutes les interactions de second ordre.

Plusieurs plans fractionnaires ont été mis au point pour répondre à des situations particulières (Goupy, 2000):

3.2.12.1 Plans de Rechtschaffner

Les plans de Rechtschaffner sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui permettent de déterminer les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux. Toutes les autres interactions sont supposées nulles avant même l'expérimentation. Le modèle mathématique adopté au départ de l'étude est donc :

$$Y = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_{i,j} a_{ij} X_i X_j + e \quad (3.29)$$

3.2.12.2 Plans de Plackett et Burman

Les matrices de calcul des plans de Plackett et Burman sont des matrices d'Hadamard. Elles permettent des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels. Les plans de Plackett et Burman sont le plus souvent sans interaction :

$$Y = a_0 + \sum_i a_i X_{i,j} + e \quad (3.30)$$

3.2.12.3 Tables de Taguchi

Les tables standard de Taguchi considèrent que les interactions d'ordre 2, c'est-à-dire les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf certaines parfaitement identifiées.. Les interactions d'ordre supérieur à 2 seront toujours considérées comme négligeables (Pillet 1999, Souvay 2002, Vigier 1988).

Les tables de Taguchi sont basées sur les matrices orthogonales d'Hadamard. Elles se présentent sous la forme d'une table orthogonale correspondant au plan d'expériences. Celle-ci peut être suivie éventuellement d'un ou plusieurs graphes linéaires et d'un triangle des interactions ce qui facilite le mode de remplissage du plan.

La désignation des tables de Taguchi est de la forme $L_g(m_f)$. Prenons l'exemple de la table $L_8(2^7)$. L_8 signifie que cette table comporte 8 lignes, c'est-à-dire 8 expériences. 2^7 signifie que cette table est tirée d'un plan complet de 7 facteurs à 2 niveaux. Il est donc évident que

cette table ne peut pas être utilisée pour étudier plus de 7 facteurs, ceux-ci étant à deux niveaux.

Taguchi propose 18 tables orthogonales qui peuvent être classées en trois familles (voir Tableau 3.16).

- L'étude des interactions est impossible
- L'étude des interactions est limitée
- L'étude des interactions est possible

	Plan à 2 niveaux	Plan à 3 niveaux	Plan à 2 et à 3 niveaux	Plan à plus de 3 niveaux
Etude des interactions impossible	$L_{12}(2^{11})$		$L_{36}(2^{11} \times 3^{11})$	
Etude des interactions limitée			$L_{18}(2^1 \times 3^7)$	$L_{32}(2^1 \times 4^9)$ $L_{50}(2^1 \times 5^{11})$
Etude des interactions possible	$L_4(2^3)$ $L_8(2^7)$ $L_{16}(2^{15})$ $L_{32}(2^{31})$ $L_{64}(2^{63})$	$L_9(3^4)$ $L_{27}(3^{13})$ $L_{81}(3^{40})$	$L_{36}(2^3 \times 3^{13})$ $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$	$L_{16}(4^5)$ $L_{64}(4^{21})$ $L_{25}(5^6)$

Tableau 3.16 : Plans d'expériences fractionnaires de Taguchi classés selon le type et le nombre de niveaux

Les tables comprenant des facteurs à 3 niveaux permettent la modélisation de second degré.

Un exemple d'application des tables de Taguchi est présenté dans l'annexe A2.

3.2.13 Plans pour surface de réponse

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Pour deux facteurs on a :

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + e \quad (3.31)$$

Il existe plusieurs types de plans du second degré dont les principaux sont (Goupy, 1999) :

- les plans composites,
- les plans de Box-Behnken
- les plans D-optimaux.

3.2.13.1 Plans composites

Les plans composites sont des plans souvent utilisés car ils se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire de premier degré complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle de premier degré. Si la réponse mesurée au centre du domaine est égale à la réponse calculée au même point, il n'est pas nécessaire d'effectuer des expériences supplémentaires. Dans le cas contraire, des expériences supplémentaires sont faites pour établir un modèle du second degré.

Les essais supplémentaires constituent la seconde étape du déroulement de l'étude. Ces nouveaux essais sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile.

Un plan composite est donc constitué de trois parties :

- Le plan factoriel. C'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points d'expériences sont aux sommets du domaine cubique d'étude.
- Le plan en étoile. Les points en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.
- Les points au centre du domaine d'étude. On ajoute toujours des points d'expériences situés au centre du domaine d'étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile.

La Figure 3.35 montre un plan composite pour l'étude de 3 facteurs. Le plan factoriel est un plan fractionnaire 2^{3-1} comprenant 4 essais (points en noir). Le plan en étoile comprend 6 points situés à égale distance du centre du domaine d'étude (points en orange). A ces deux plans, on rajoute un ou plusieurs points centraux (point en gris).

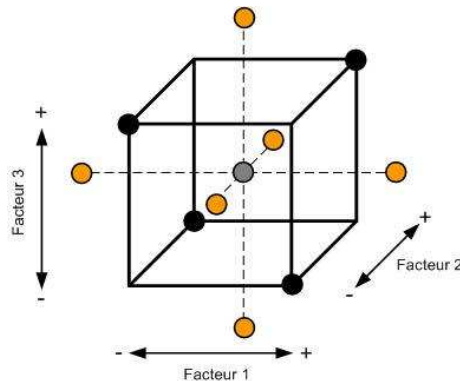


Figure 3.35 : Plan composite pour l'étude de 3 facteurs

Il existe trois classes de plans composites :

- Si les points en étoile sont sur les faces du domaine cubique, on parle de plan central composite à face centrée
- Si les points en étoile sont à l'extérieur du domaine cubique, on parle de plan central composite extérieur ou CCE
- Si les points en étoile sont à l'intérieur du domaine cubique, on parle de plan central composite intérieur ou CCI

Le Tableau 3.17 présente la matrice d'expériences pour un plan composite à trois facteurs.

Essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	
1	-1	-1	-1	Plan factoriel fractionnaire 2^{3-1}
2	-1	+1	+1	
3	+1	-1	+1	
4	+1	+1	-1	
5	$-\alpha$	0	0	Plan en étoile
6	$+\alpha$	0	0	
7	0	$-\alpha$	0	
8	0	$+\alpha$	0	
9	0	0	$-\alpha$	
10	0	0	$+\alpha$	
11	0	0	0	Point au centre

Tableau 3.17 : Plan composite pour l'étude de 3 facteurs

Soit n_f le nombre d'expériences du plan factoriel, n_α le nombre d'expériences du plan en étoile et n_0 le nombre d'expériences au centre.

Un plan composite respecte le critère d'isovariance par rotation s'il respecte la condition suivante (Goupy, 1999) :

$$\alpha = n_f^{1/4} \quad (3.32)$$

Un plan composite respecte le critère de presque orthogonalité s'il respecte la condition suivante (Goupy, 1999) :

$$\alpha = \left(\frac{n_f (\sqrt{n_f + n_\alpha + n_0} - \sqrt{n_f})^2}{4} \right)^{1/4} \quad (3.33)$$

3.2.13.2 Plans de Box-Behnken

Box et Behnken ont proposés des plans en 1960 (Goupy, 1999). Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possède la propriété d'être séquentielle. On peut entreprendre l'étude des k premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter de nouveaux sans perdre des essais déjà effectués. Il permet de déterminer le modèle polynômial du second degré complet, c'est-à-dire avec tous les effets, les interactions d'ordre 2 et les termes du second degré.

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. Lorsque le nombre de dimensions est égale à n avec n supérieur à 3, on parle de n -cube ou hypercube à n dimensions. Par exemple, l'hypercube à 4 dimensions sera un 4-cube et l'hypercube à 5 dimensions sera un 5-cube.

On place les points d'expériences non pas aux sommets du cube ou de l'hypercube, mais au milieu des arêtes, et au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de placer tous les points d'expériences à égale distance du centre du domaine d'étude, donc une sphère dans un espace à trois dimensions et une hypersphère pour plus de trois dimensions.

La Figure 3.36 montre le plan de Box-Behnken pour 3 facteurs. Les points d'expériences sont situés au milieu des arêtes et au centre du cube. Le cube possède 12 arêtes. On a l'habitude d'ajouter des points d'expériences au centre du domaine d'étude, en général 3. Le plan de Box-Behnken pour 3 facteurs a donc $12+3 = 15$ essais (voir Tableau 3.18).

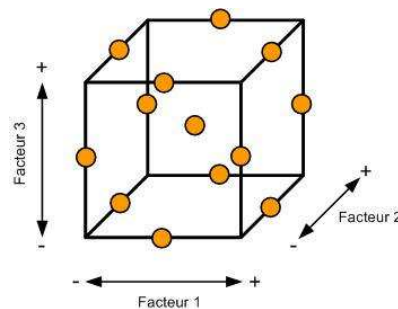


Figure 3.36 : Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs

N°	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Tableau 3.18 : Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs

Box et Behnken n'ont publié que des plans pour 3 à 7 facteurs, 9 à 12 facteurs et 16 facteurs.

3.2.13.3 Plans D-optimaux

Les plans D-optimaux sont souvent utilisés lorsque le domaine d'étude n'est pas entièrement accessible. Il existe des contraintes qui interdisent l'accès à certaines régions du domaine d'étude. Par exemple, les réglages de l'appareil ne permettent pas d'atteindre les niveaux préconisés par la théorie où des combinaisons de niveaux peuvent se révéler dangereuses : réaction explosive pour les chimistes, concentration toxique pour les médecins, etc.

Les plans D-optimaux sont aussi souvent utilisés lorsque l'on veut diminuer le nombre des essais d'un plan classique. On impose un nombre d'essais et l'algorithme de calcul des plans D-optimaux conserve, pour un modèle donné, les meilleurs points d'expériences.

Les algorithmes les plus connus pour la détermination des plans D-optimaux sont ceux de Mitchell et de Fedorov (Goupy, 1999). Ces algorithmes présentent une bonne solution au problème mais on n'est jamais sûr qu'il s'agit de la meilleure solution. En effet, l'algorithme calcule le déterminant de la matrice $[X]^t[X]$ pour des ensembles de points d'expériences et cherche la valeur la plus élevée (Critère de D-optimalité). Il s'arrête quand il ne peut plus faire progresser la valeur du déterminant. Il y a peut être d'autres déterminants plus élevés.

3.3 Exemple d'application des plans d'expériences en thermique du bâtiment

3.3.1 Définition du problème

Il s'agit de présenter un exemple d'application de la méthode des plans d'expériences dans une étude paramétrique en thermique du bâtiment.

Nous allons représenter via un modèle polynômial, la relation entre les besoins de chauffage annuels du bâtiment Beethoven et les caractéristiques de l'enveloppe et de l'éclairage artificiel. Pour déterminer le modèle polynômial, nous avons choisi comme exemple, le plan D-optimaux. Le climat considéré est celui de la ville d'Agen.

Le plan d'expériences choisi pour déterminer les besoins de chauffage en kWh/m².an est un plan comprenant 9 facteurs à 3 niveaux chacun (voir Tableau 3.19).

Facteur	Notation en coordonnée centrée réduite	Niveau			Unité
		(-1)	(0)	(+1)	
U_{parois}	X_1	0,1	0,2	0,3	W/m ² K
$\sum \Psi L$	X_2	2,04	51,87	101,7	W/K
U_w	X_3	0,77	1,66	2,54	-
FS	X_4	0,49	0,63	0,77	-
%vitrage	X_5	50	62,5	75	%
Inertie	X_6	Très légère	Moyenne	Très lourde	-
Ori	X_7	N/S	SO/NE	E/O	-
Permea	X_8	0,11	0,415	0,72	vol/h sous 4 Pa
$Al_{\text{éclairage}}$	X_9	6	8,5	11	W/m ²

Tableau 3.19 : Facteurs du plan d'expériences

Les niveaux des facteurs sont présentés en coordonnées centrées réduites. Le niveau bas est noté par (-1) et le niveau haut par (+1). Le niveau (0) est le milieu du domaine de variation d'un facteur.

Les facteurs considérés sont :

- U_{parois} est le coefficient de transmission thermique des parois opaques (y compris le plancher bas et le plancher haut). Le niveau bas (-1) correspond aux valeurs exigées par le label allemand Passivhaus (Feist et al 2005). Le niveau haut (+1) est choisi par rapport aux exigences de la réglementation thermique (voir Tableau 3.2).
- $\sum \Psi L$ est la somme des produits du coefficient de transmission thermique par la longueur de chaque pont thermique. Les niveaux, bas (-1) et haut (+1), correspondent respectivement aux valeurs exigées par le label allemand Passivhaus (Feist et al 2005) et la réglementation thermique (voir Tableau 3.2).
- U_w et FS représentent respectivement, le coefficient de transmission thermique et le facteur solaire des parois vitrées. Le niveau bas (-1) est un triple vitrage rempli de krypton avec une couche à faible émissivité. Le niveau (0) est un double vitrage 4/16/4 rempli d'air ayant une couche à faible émissivité. Le niveau haut (+1) est un double vitrage rempli d'air (voir Tableau 3.20). La menuiserie est supposée être en PVC pour les trois cas (voir Tableau 3.20).

Type de vitrage	Epaisseurs	U_w (W/m ² K)	FS (-)	$\tau_{(0)}$ (-)	τ_{diffus} (-)
Triple vitrage rempli de krypton + 2 couches à faibles émissivité	4/16/4/16/4	0,77	0,49	0,41	0,32
Double vitrage rempli d'air + 1 couche faible émissivité	4/16/4	1,66	0,63	0,57	0,47
Double vitrage rempli d'air	4/16/4	2,54	0,77	0,73	0,63

Tableau 3.20 : Caractéristiques des vitrages (WINDOW5.1, 2005)

- %vitrage est le pourcentage de surface vitrée du bâtiment par rapport à la surface totale de l'enveloppe, hors plancher haut et plancher bas. Il est de 50% pour le niveau (-1), 62,5% pour le niveau (0) et 70% pour le niveau (+1).
- Inertie est l'inertie thermique du bâtiment définie dans la réglementation thermique. Les niveaux (-1), (0) et (+1) sont déterminés à l'aide des règles ThI de calcul de l'inertie thermique des bâtiments (Réglementation thermique, 2005).

Inertie	Caractéristiques de l'enveloppe
Très légère	Plancher bas : 15 cm de béton – isolation intérieure Plancher haut : 15 cm de béton – avec faux plafond – isolation intérieure Plancher intermédiaire : 15 cm de béton – avec faux plafond Murs extérieurs : 20 cm de parpaing - isolation intérieure Cloisons : parois légères en plâtre
Moyenne	Plancher bas : 15 cm de béton – isolation extérieure Plancher haut : 15 cm de béton – avec faux plafond – isolation extérieure Plancher intermédiaire : 15 cm de béton – avec faux plafond Murs extérieurs : 20 cm de parpaing - isolation intérieure Cloisons : parois légères en plâtre
Très lourde	Plancher bas : 20cm de béton – isolation extérieure Plancher haut : 20 cm de béton – sans faux plafond – isolation extérieure Plancher intermédiaire : 20 cm de béton – sans faux plafond Murs extérieurs : 20 cm de parpaing - isolation extérieure Cloisons : 10 cm de brique de béton et plâtre

Tableau 3.21 : Caractéristiques de l'enveloppe pour chaque niveau d'inertie

- *Ori* est l'orientation du bâtiment, qui est Nord/Sud (N/S) au niveau (-1), Sud-Ouest/Nord-Est (SO/NE) au niveau (0) et Est/Ouest (E/O) au niveau (+1).
- *Permea* est la perméabilité de l'enveloppe exprimée en vol/h sous 4 Pa. Le niveau bas est la valeur limite de la perméabilité à l'air des bâtiments passifs (0,6 vol/h sous 50 Pa) (Feist et al 2005). Le niveau haut est la valeur par défaut pour les immeubles de bureaux selon la réglementation thermique (Règlementation thermique, 2005).
- *Aleclairage* correspond aux gains internes dus à l'éclairage artificiel exprimés en W/m². Le niveau haut correspond à l'éclairage installé dans le bâtiment pour la configuration de référence. Le niveau bas correspond à un éclairage très basse consommation.

3.3.2 Modélisation à l'aide d'un plan D-optimaux

Le plan D-optimaux utilisé comporte 81 expériences ou simulations contre $3^9 = 19683$ simulations que comporte un plan factoriel complet à trois niveaux et $2^9 = 512$ simulations que comporte un plan factoriel complet à deux niveaux. Ce plan a été généré à l'aide de la bibliothèque de calcul statistique du logiciel MATLAB (MATLAB, 2005) (voir Annexe A7).

81 simulations ont été effectuées pour l'immeuble de bureaux défini précédemment en considérant le climat de la ville d'Agen. Le modèle polynômial obtenu est le suivant :

$$\begin{aligned}
 Y = & 37,6547 + (3,2197)*X_1 + (3,4928)*X_2 + (16,1878)*X_3 + (-2,9851)*X_4 + (5,4095)*X_5 \\
 & + (-1,1123)*X_6 + (1,31)*X_7 + (2,1663)*X_8 + (-2,2356)*X_9 + (0,03634)*X_1.X_2 + (0,20947)*X_1.X_3 \\
 & + (-0,040823)*X_1.X_4 + (-0,4159)*X_1.X_5 + (0,090738)*X_1.X_6 + (-0,021959)*X_1.X_7 \\
 & + (0,0078125)*X_1.X_8 + (-0,053623)*X_1.X_9 + (0,31621)*X_2.X_3 + (-0,097538)*X_2.X_4 \\
 & + (0,073577)*X_2.X_5 + (0,058047)*X_2.X_6 + (-0,05311)*X_2.X_7 + (-0,0026063)*X_2.X_8 \\
 & + (-0,039389)*X_2.X_9 + (-0,59766)*X_3.X_4 + (3,1989)*X_3.X_5 + (0,17235)*X_3.X_6 \\
 & + (0,15139)*X_3.X_7 + (0,13601)*X_3.X_8 + (-0,25606)*X_3.X_9 + (-0,38291)*X_4.X_5 \\
 & + (-0,46521)*X_4.X_6 + (0,099105)*X_4.X_7 + (-0,067674)*X_4.X_8 + (0,16307)*X_4.X_9 \\
 & + (-0,43537)*X_5.X_6 + (0,1456)*X_5.X_7 + (0,056069)*X_5.X_8 + (0,008882)*X_5.X_9 \\
 & + (0,25511)*X_6.X_7 + (-0,00068946)*X_6.X_8 + (-0,15129)*X_6.X_9 + (-0,015624)*X_7.X_8 \\
 & + (-0,13696)*X_7.X_9 + (0,026339)*X_8.X_9 + (-0,15596)*X_1^2 + (0,024316)*X_2^2 + (-0,3907)*X_3^2 \\
 & + (0,27244)*X_4^2 + (0,24957)*X_5^2 + (1,4707)*X_6^2 + (-0,10897)*X_7^2 + (-0,021499)*X_8^2 \\
 & + (-0,014725)*X_9^2
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

La Figure 3.37 montre une comparaison entre la réponse obtenue par le modèle polynômial du second degré (voir équation (3.34)), calculé à partir du plan D-optimaux, et celle obtenue par simulation numérique. Le nombre de points de comparaison est de 582, repartis dans tout le domaine expérimental.

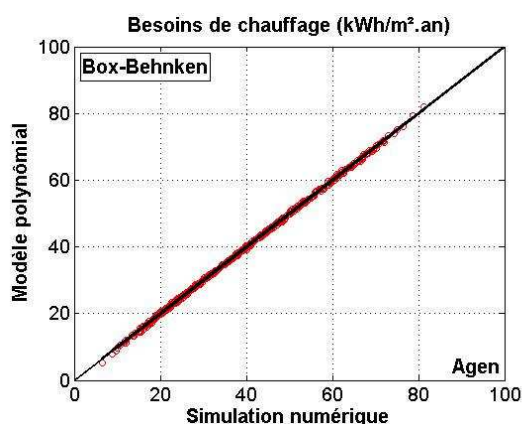


Figure 3.37 : Comparaison entre les résultats du modèle polynômial et les simulations numériques pour le plan D-optimaux de 81 expériences

On constate une très bonne cohérence entre le modèle polynômial et les simulations numériques. La différence maximale absolue est de 1,44 kWh/m².an, soit 2,6% en relatif.

3.3.3 Synthèse et analyse

Les résultats de cet exemple sont encourageants. Ils montrent la capacité de la méthode des plans d'expériences à déterminer à l'aide d'un nombre limité d'expériences ou simulations des modèles polynômiaux avec une précision appréciable. Ces modèles polynômiaux peuvent servir à effectuer des études de sensibilité et d'optimisation.

Le Tableau 3.22 donne les besoins de chauffage minimaux, moyens (au centre du domaine d'étude) et maximaux obtenu par la simulation numérique et par le modèle polynômial. Nous montrons également les besoins de chauffage pour la configuration de référence.

Besoins de chauffage	Minimum	Moyen	Maximum
U_{parois}	0,1	0,2	0,2
$\sum \Psi L$	2,04	51,87	101,7
U_w	0,77	1,66	2,54
FS	0,77	0,63	0,49
%vitrage	50	62,5	70
Inertie	Très Lourde	Moyenne	Très Légère
Ori	N/S	SO/NE	E/O
Permea	0,11	0,415	0,72
$AI_{\text{éclairage}}$	11	8,5	6
Besoins de chauffage, modèle polynômial (kWh/m ² .an)	5,63	37,65	81,87
Besoins de chauffage, simulation numérique (kWh/m ² .an)	6,50	37,48	81,31
Ecart absolu (kWh/m ² .an)	0,87	0,17	0,56
Ecart relatif (%)	13,41	0,47	0,68

Tableau 3.22 : Besoins de chauffages moyens et extrêmes et de références du bâtiment étudié

Le modèle polynômial peut servir éventuellement à définir des abaques de sélection de solutions comme le montre la Figure 3.38.

Chaque abaque représente des courbes d'isoréponse en fonction des niveaux des variables. Ce type d'abaque peut être utilisé comme une méthode graphique rapide de sélection de solutions optimales en terme de performances énergétiques.

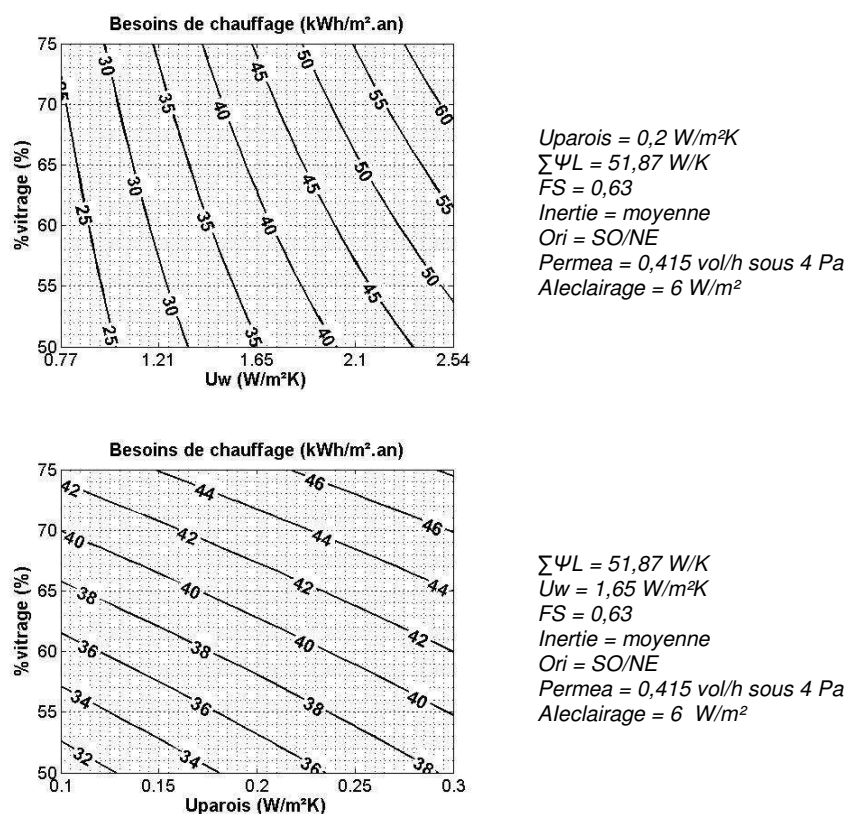


Figure 3.38 : Courbes d'isoréponse pour les besoins de chauffage

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes attachés à présenter le cas d'étude qui consiste en un immeuble de bureaux, appelé Beethoven, dont les caractéristiques thermiques de base ont été choisies selon les exigences de la réglementation thermique en vigueur. Ces caractéristiques sont appelées « configuration de référence ». Les performances énergétiques du bâtiment ont été évaluées par rapport aux climats définis par la réglementation thermique. Trois climats ont été retenus pour la suite de ce travail, à savoir Nancy, Agen et Nice.

Ensuite, nous avons présenté les principes de base de la méthode des plans d'expériences qui sera la base pour le développement de la méthodologie de conception des bâtiments à basse consommation d'énergie. Un exemple d'application de cette méthode en thermique du bâtiment a été présenté. Cet exemple a montré le grand intérêt que présente l'utilisation de la méthode des plans d'expériences. En effet, elle permet de réduire considérablement le nombre de simulations à effectuer pour atteindre les objectifs visés, tout en gardant une très bonne précision sur les résultats.

Le chapitre suivant sera consacré au développement de la méthodologie de conception et à l'analyse de solutions permettant de concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie.

Développement des modèles polynômiaux et analyses

Dans le processus de conception d'un bâtiment à basse consommation d'énergie, il est nécessaire de réaliser des études paramétriques à l'aide des outils de simulation numérique, dans le but d'identifier des solutions permettant d'atteindre les objectifs visés en termes de performance énergétique et de confort thermique. Réaliser de telles études peut s'avérer laborieux surtout si le nombre de paramètres à considérer est important, d'où la nécessité de disposer d'une méthodologie permettant de mener à bien ce type d'études de façon simple, rapide et efficace.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de développer à l'aide de la simulation numérique et de la méthode des plans d'expériences, des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétiques et du confort thermique d'été du bâtiment Beethoven. Ces modèles peuvent remplacer ensuite la simulation numérique pour la recherche de solutions optimales permettant de concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie.

Le début de ce chapitre est consacré aux travaux de développement des modèles polynômiaux. Nous allons analyser le potentiel et les limites de la méthode des plans d'expériences pour déterminer, par le biais de la simulation numérique, des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétiques et du confort thermique du bâtiment Beethoven. Ceci permet de définir une méthodologie générale d'application de la méthode des plans d'expériences afin de déterminer des modèles polynômiaux d'une précision satisfaisante.

Ensuite, ces modèles sont mis en œuvre pour réaliser une étude de sensibilité concernant les performances énergétiques et le confort thermique d'été du bâtiment Beethoven ainsi qu'une analyse de solutions permettant de concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie respectant certains critères énergétiques, pour les climats de Nancy, Agen et Nice.

4.1 Développement de modèles polynômiaux à l'aide de la méthode des plans d'expériences

4.1.1 Introduction

Dans une étude de conception des bâtiments à basse consommation d'énergie, on peut s'intéresser aux besoins de chauffage, aux besoins de rafraîchissement, à la consommation d'énergie annuelle et au confort thermique d'été. Nous allons donc mettre en œuvre la méthode des plans d'expériences pour évaluer ces différentes grandeurs à l'aide de modèles polynômiaux prenant en compte des facteurs relatifs à l'enveloppe du bâtiment aux systèmes. Les climats considérés sont ceux de Nancy, Agen et Nice.

Les modèles polynômiaux développés peuvent servir à des études de sensibilité et d'optimisation. Une étude d'optimisation consiste à mettre en œuvre les modèles polynômiaux pour identifier dans le domaine d'étude des solutions optimales qui vérifient certains critères. Plus ces modèles sont précis, plus l'incertitude et le risque sur les résultats obtenus diminuent.

Nous avons vu auparavant, qu'il existe plusieurs types de plans d'expériences du premier et du second degré avec des emplacements différents des points d'expériences. Ces plans d'expériences n'auront pas a priori le même niveau de précision selon la réponse que l'on cherche à modéliser. En effet, les réponses que nous allons considérer, ne présenteront pas le même nombre de facteurs et varieront selon des phénomènes physiques plus ou moins différents. A titre d'exemple, les besoins de chauffage sont dus aux déperditions par transmission et par ventilation tandis que les besoins de rafraîchissement sont essentiellement dus aux apports solaires et aux gains internes.

De plus, il est connu que plus le nombre de facteurs augmente et le domaine de variation de la réponse est large, plus on risque de ne pas aboutir à des modèles polynômiaux avec une précision acceptable.

Pour améliorer la précision des modèles polynômiaux, les expérimentateurs ont souvent tendance à adapter leur problème à la méthode des plans d'expériences, en réduisant le nombre de facteurs et leurs domaines de variation ainsi que le nombre de niveaux à prendre en compte. Il nous semble cependant indispensable de pouvoir faire l'inverse, c'est-à-dire, adapter la méthode des plans d'expériences au problème que l'on souhaite résoudre. Ceci permet de prendre en compte un grand nombre de facteurs et d'élargir le domaine d'étude des réponses, ce qui peut être, par ailleurs, une nécessité dans les études de conception des bâtiments à basse consommation d'énergie.

Ainsi, nous allons analyser les différentes réponses citées précédemment tout en choisissant des domaines d'étude larges, un nombre élevé de paramètres et de niveaux. L'objectif est de montrer le potentiel et les limites de la méthode des plans d'expériences et de définir une méthodologie générale d'application de cette méthode pour des études paramétriques de conception des bâtiments à basse consommation d'énergie.

4.1.2 Description des facteurs et des réponses considérés

Le bâtiment considéré est le bâtiment Beethoven défini dans le chapitre 3.

Besoins de chauffage : Le Tableau 3.19 donne les facteurs considérés pour la modélisation des besoins de chauffage.

Facteur	Notation en coordonnées centrées réduites	Niveau					Unité
		(-1)	(-0,5)	(0)	(+0,5)	(+1)	
U_{parois}	X_1	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	W/m²K
$\sum \Psi_L$	X_2	2,04	26,96	51,87	76,76	101,70	W/K
U_w	X_3	0,77	1,21	1,66	2,01	2,54	-
FS	X_4	0,49	0,56	0,63	0,70	0,77	-
%vitrage	X_5	50,00	56,25	62,50	68,75	75,00	%
Inertie	X_6	Très Légère	Légère	Moyenne	Lourde	Très Lourde	-
Ori	X_7	N/S	NEE/SSO	SO/NE	SSE/NNO	E/O	-
Permea	X_8	0,11	0,26	0,42	0,57	0,72	vol/h sous 4 Pa
$Al_{\text{éclairage}}$	X_9	6,00	7,25	8,50	9,70	11,00	W/m²

Tableau 4.1 : Facteurs du plan d'expériences pour l'évaluation des besoins de chauffage

Besoins de rafraîchissement : Le Tableau 4.2 donne les facteurs considérés pour la détermination des besoins de rafraîchissement.

Deux facteurs supplémentaires ont été introduits par rapport au plan des besoins de chauffage, à savoir *Surventil* et *Masques* :

- *Surventil* est le débit de renouvellement d'air en vol/h lié à la surventilation mécanique nocturne. Le débit de renouvellement d'air est nul pour le niveau (-1), égal à 2,5 vol/h pour le niveau (0) et à 5 vol/h pour le niveau (+1).
- *Masques* quantifie des protections solaires fixes sous forme de casquettes (voir Figure 4.1). Pour le niveau (+1), nous considérons que les masques sont dimensionnés de manière à ce que les apports solaires directs sur les baies vitrées soient nuls. Au niveau (0), les masques laissent passer 50% des apports solaires directs et le niveau (-1) signifie l'absence de protections solaires.

Facteur	Notation en coordonnées centrées réduites	Niveau					Unité
		(-1)	(-0,5)	(0)	(+0,5)	(+1)	
U_{parois}	X_1	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	W/m²K
$\sum \Psi_L$	X_2	2,04	26,96	51,87	76,76	101,70	W/K
U_w	X_3	0,77	1,21	1,66	2,01	2,54	-
FS	X_4	0,49	0,56	0,63	0,70	0,77	-
%vitrage	X_5	50,00	56,25	62,50	68,75	75,00	%
Inertie	X_6	Très Légère	Légère	Moyenne	Lourde	Très Lourde	-
Ori	X_7	N/S	NEE/SSO	SO/NE	SSE/NNO	E/O	-
Permea	X_8	0,11	0,26	0,42	0,57	0,72	vol/h sous 4 Pa
$Al_{\text{éclairage}}$	X_9	6,00	7,25	8,50	9,70	11,00	W/m²
Surventil	X_{10}	0	1,25	2,50	3,75	5,00	vol/h
Masques	X_{11}	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	-

Tableau 4.2 : Facteurs du plan d'expériences pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement

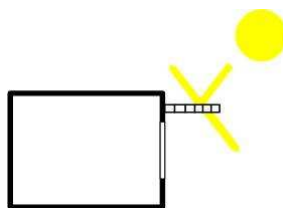


Figure 4.1 : Représentation schématique d'une casquette

Consommation d'énergie finale annuelle : La consommation d'énergie annuelle concerne la consommation annuelle d'énergie finale des postes suivants :

- La consommation d'énergie pour le chauffage
- La consommation d'énergie pour le rafraîchissement
- La consommation d'électricité pour l'éclairage artificiel
- La consommation d'électricité pour les équipements de bureautique
- La consommation d'électricité pour le renouvellement d'air par ventilation mécanique
- La consommation d'électricité pour la surventilation mécanique nocturne

Les facteurs utilisés pour la modélisation de l'énergie annuelle sont présentés dans le Tableau 4.3. Deux facteurs supplémentaires ont été introduits par rapport au plan d'expériences des besoins de rafraîchissement, à savoir le coefficient de performance global de l'installation de chauffage COP_g et l'efficacité globale de l'installation de rafraîchissement EER_g .

Nous rappelons que le coefficient de performance global ou efficacité globale est le ratio entre les besoins annuels de chauffage ou de rafraîchissement du bâtiment et la consommation d'énergie correspondante de l'unité de production d'énergie (pompe à chaleur, chaudière, groupe froid ...) et des auxiliaires (pompe de circulation, ventilateurs, appoint électrique,...).

Facteur	Notation en coordonnées centrées réduites	Niveau					Unité
		(-1)	(-0,5)	(0)	(+0,5)	(+1)	
U_{parois}	X_1	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	W/m²K
$\sum \Psi L$	X_2	2,04	26,96	51,87	76,76	101,70	W/K
U_w	X_3	0,77	1,21	1,66	2,01	2,54	-
FS	X_4	0,49	0,56	0,63	0,70	0,77	-
%vitrage	X_5	50,00	56,25	62,50	68,75	75,00	%
Inertie	X_6	Très Légère	Légère	Moyenne	Lourde	Très Lourde	-
Ori	X_7	N/S	NEE/SSO	SO/NE	SSE/NNO	E/O	-
Permea	X_8	0,11	0,26	0,42	0,57	0,72	vol/h sous 4 Pa
$A_{\text{éclairage}}$	X_9	6,00	7,25	8,50	9,70	11,00	W/m²
Surventil	X_{10}	0	1,25	2,50	3,75	5,00	vol/h
Masques	X_{11}	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	-
COP_g	X_{12}	1,00	1,75	2,50	3,25	4,00	-
EER_g	X_{13}	1,00	1,75	2,50	3,25	4,00	-

Tableau 4.3 : Facteurs du plan d'expériences pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle

Confort thermique : Les facteurs pris en compte pour l'évaluation du confort thermique d'été sont identiques à ceux des besoins de rafraîchissement (voir Tableau 4.2).

Deux réponses sont définies :

- $\sum DH$: Somme des degrés-heures de dépassement d'un seuil de température. Ce seuil de température peut être de 26°C, 27°C, 28°C, etc...
- nb-h : Nombre d'heures de dépassement d'un seuil de température. Ce seuil de température peut être également de 26°C, 27°C, 28°C, etc.

Consommation d'énergie finale des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne : Nous avons mis en place également des modèles polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne. En

effet, ces modèles vont nous servir pour les travaux d'amélioration des performances de la configuration de référence du bâtiment Beethoven au chapitre 5.

La gestion de la surventilation mécanique nocturne consiste à la mise en marche de la surventilation uniquement en saison estivale, en période d'inoccupation entre 22h et 6h du matin si la température opérative intérieure est supérieure à la température extérieure de 2°C (Breesch et al, 2005).

Les facteurs pris en compte dans le plan d'expériences de la surventilation sont les mêmes que ceux des besoins de rafraîchissement (voir Tableau 4.2). Ceci permet de prendre en compte l'influence de l'évolution de la température intérieure opérative en saison estivale sur le fonctionnement de la surventilation nocturne.

Le débit de surventilation nocturne varie entre 0 vol/h et 5 vol/h en passant par cinq niveaux. Les pertes de charge du réseau aéraulique pour la surventilation, pour chaque niveau, ont été calculées pour déterminer la puissance requise du ventilateur d'extraction, en supposant que son rendement global est de 20% (voir Tableau 4.4).

	Niveau					Unité
	(-1)	(-0,5)	(0)	(+0,5)	(+1)	
Débit de surventilation (Surventil)	0	1,25	2,50	3,75	5,00	vol/h
Puissance du ventilateur	0.00	521,51	1051,63	1585,42	2137,75	W

Tableau 4.4 : Consommation d'énergie des auxiliaires pour la surventilation mécanique nocturne

4.1.3 Description des plans d'expériences utilisés

Afin de modéliser les réponses citées précédemment, nous avons mis en œuvre sept plans d'expériences standards, à savoir deux plans du premier degré et cinq plans du second degré ou plans pour surface de réponse :

- Table $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi : table de 32 simulations pour une modélisation du premier degré. Elle permet de déterminer tous les termes X_i que comprennent le polynôme et un nombre limité de termes $X_i X_j$ choisis par le modélisateur. Cette table n'est pas adaptée pour étudier un nombre élevé de paramètres (voir Annexe A3).
- Table $L_{64}(2^{63})$ de Taguchi : table de 64 simulations pour une modélisation du premier degré. Elle permet de déterminer tous les termes X_i que comprennent le polynôme et un nombre important de termes $X_i X_j$ choisis également par le modélisateur. Cette table est mieux adaptée à des études prenant en compte un nombre important d'interactions entre facteurs (voir Annexe A4).
- Table $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi : table de 81 simulations pour une modélisation du deuxième degré. Elle permet de déterminer tous les termes X_i et X_i^2 du polynôme. L'inconvénient majeur de cette table est le nombre limité de termes $X_i X_j$ pris en compte, ce qui risque de dégrader la précision du modèle pour un nombre élevé de paramètres (voir Annexe A5).
- Plan composite à face centrée de la table $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi : ce plan est utilisé pour une modélisation du deuxième degré. Il consiste à introduire des simulations supplémentaires à celles de la table $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi au centre et sur les axes de coordonnées du domaine d'étude. Vu le nombre de facteurs que nous voulons étudier, le nombre total de simulations que nécessite ce plan varie entre 51 et 55. Ce plan permet d'introduire des termes du deuxième degré (X_i^2) au polynôme calculé par la table $L_{32}(2^{31})$.

- Plan composite à face centrée de la table $L_{64}(2^{63})$ de Taguchi : ce plan sert également pour une modélisation du deuxième degré en introduisant des simulations supplémentaires à celles de la table $L_{64}(2^{63})$ de Taguchi au centre et sur les axes de coordonnées du domaine d'étude. Vu le nombre de facteurs que nous voulons étudier, le nombre total de simulations varie entre 83 et 87. Ce plan permet d'introduire des termes du deuxième degré (X_i^2) au polynôme calculé par la table $L_{64}(2^{63})$.
- Plan de Box-Behnken : ce plan est utilisé pour une modélisation du deuxième degré. Il permet de déterminer tous les termes du polynôme de second degré. Ce plan nécessite 177 simulations pour notre cas. Vu que ce plan n'existe pas pour 13 facteurs, il n'a pas été utilisé pour étudier la consommation d'énergie annuelle (voir Annexe A6).
- Plan D-optimaux : Il s'agit également d'un plan pour une modélisation du deuxième degré. Il permet de déterminer tous les termes du polynôme de second degré. Dans notre cas, le nombre de simulations de ce plan varie selon le nombre de facteurs entre 81 et 110 simulations (voir Annexes A7 et A8).

L'évaluation de la précision des différents modèles polynômiaux qui seront développés, est réalisée en analysant les écarts absolus entre les résultats obtenus par ces modèles et ceux obtenus par la simulation numérique.

Cette analyse consiste à étudier, pour chaque modèle polynômial, la dispersion des écarts absolus sur un ensemble de simulations en calculant, la moyenne M , l'écart-type σ , l'écart absolu maximal $\Delta_{\max}$. Cette analyse va permettre de quantifier l'incertitude sur chaque modèle polynômial.

Soit n le nombre de simulations qui ont servi à calculer M , σ , et $\Delta_{\max}$. Ces trois grandeurs sont exprimées à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{cases} M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i| \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (|r_i| - M)^2} \\ \Delta_{\max} = \max_{i=1}^n (|r_i|) \end{cases} \quad (4.1)$$

Où r_i est l'écart absolu entre la valeur obtenue par le polynôme et celle calculée par simulation numérique.

Il est à noter que les simulations numériques qui vont servir à évaluer la précision d'un modèle polynômial correspondent à des configurations de facteurs différentes de celles qui ont servi à la détermination de ses coefficients.

Le nombre total de simulations numériques que nous avons réalisées pour déterminer et valider les modèles polynômiaux des différents climats est de 3521 simulations annuelles. La durée d'une simulation annuelle varie, selon la puissance du calculateur, entre une heure et deux heures. Le pas de temps de simulation est de 5 min.

4.1.4 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage

Les besoins de chauffage ont été modélisés à l'aide des sept plans d'expériences définis précédemment en considérant les climats de Nancy, Agen et Nice.

Le nombre total de simulations numériques que nous avons effectuées est de 663 simulations pour chaque climat. Ces simulations ont servi à la détermination et à la validation des modèles polynômiaux. En effet, le nombre maximal de simulations que nécessite la détermination des coefficients d'un polynôme varie selon le nombre de coefficients entre 32 et 177 simulations. Il reste donc au minimum, pour chaque polynôme, 486 simulations numériques qui serviront à l'évaluation de sa précision.

La Figure 4.2 montre les résultats obtenus pour les besoins de chauffage à Agen. Pour chaque plan d'expériences, nous présentons une comparaison entre les besoins de chauffage obtenus par le modèle polynômial et ceux obtenus, par la simulation numérique. Les points d'expériences pour la comparaison sont repartis dans tout le domaine d'étude, y compris des niveaux (0) et ($\pm 0,5$).

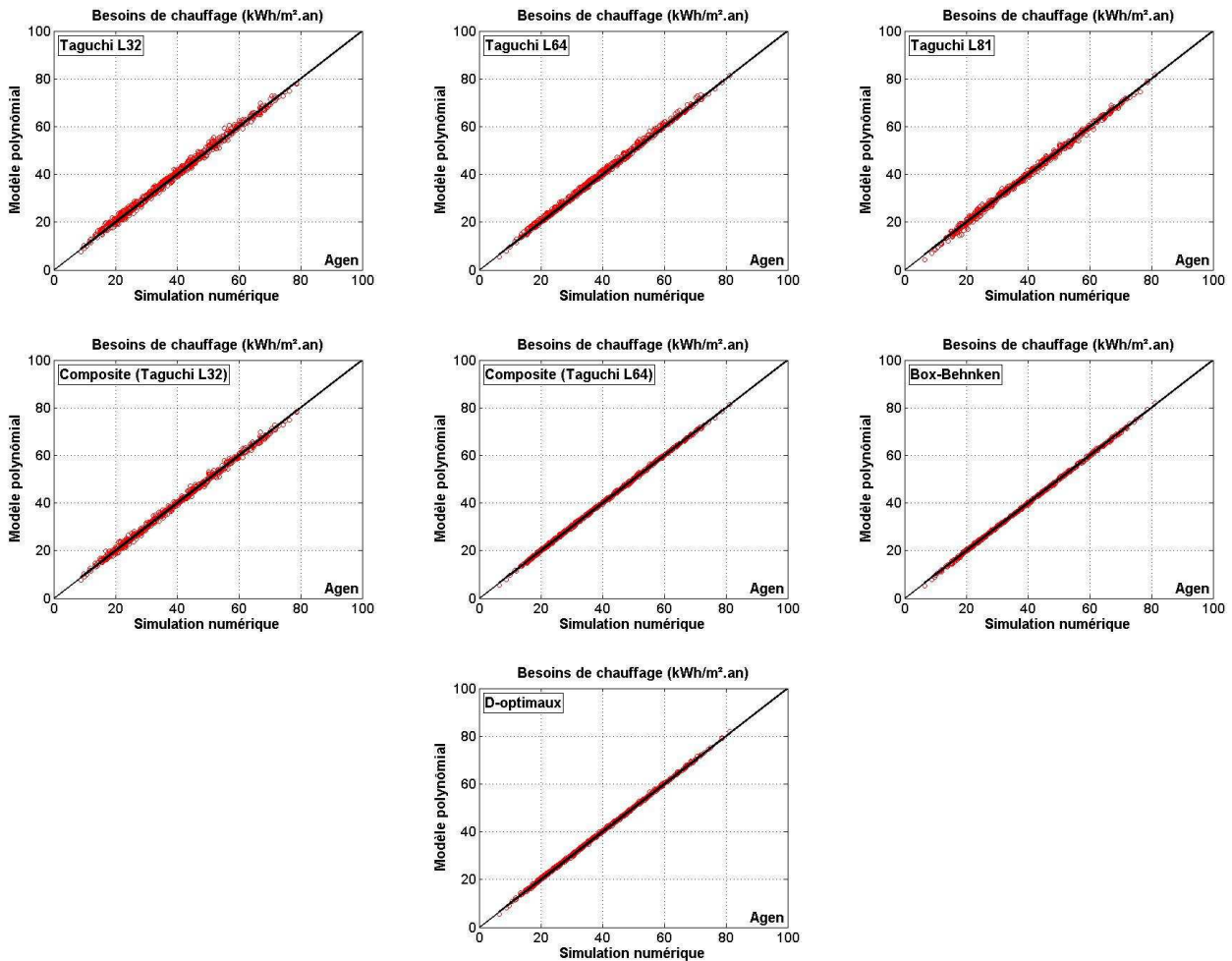


Figure 4.2 : Comparaison modèle polynômial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins de chauffage à Agen

Le Tableau 4.5 donne les valeurs de la moyenne M , l'écart-type σ_r et l'écart maximal $\Delta_{\max}$. Ce tableau montre également le nombre n de points d'expériences utilisés pour la comparaison, ce nombre varie entre 486 et 631. La Figure 4.3 montre les fréquences cumulées des écarts absolus r_i .

Nous pouvons remarquer que les écarts absolus sont majoritairement inférieurs à la valeur $(M + \sigma_r)$. Considérons à titre d'exemple, les fréquences cumulées des écarts absolus pour Agen (voir Figure 4.3). En comparant les fréquences cumulées de chaque plan avec les valeurs correspondantes de M et σ_r , on peut constater que ces écarts sont effectivement majoritairement inférieurs à $(M + \sigma_r)$. Ceci peut également être vérifié pour les autres climats.

La meilleure précision est obtenue avec les plans du deuxième degré D-optimaux, Box-Behnken et composite $L_{64}(2^{63})$. Ces plans présentent des niveaux de précision très proches. En se basant sur les indicateurs de précision définis précédemment, il apparaît que la moyenne des écarts absolus varie entre 0,18 kWh/m².an et 0,29 kWh/m².an. Ces écarts sont majoritairement inférieurs à 0,45 kWh/m².an. L'écart maximal observé est de 2,24 kWh/m².an. Ce niveau de précision peut être jugé comme acceptable.

Globalement, la moyenne des écarts absolus observés sur les autres plans d'expériences, varie entre 0,5 et 1,04 kWh/m².an. Ces écarts sont majoritairement inférieurs à 1,78 kWh/m².an. Les écarts maximaux sont de l'ordre de 4 kWh/m².an.

Les plans du deuxième degré Taguchi $L_{81}(3^{40})$ et composite $L_{32}(2^{31})$ sont moins précis que les autres plans du deuxième degré à cause d'un nombre limité d'interactions (termes X_iX_j dans le polynôme) pris en compte. De plus, on obtient une meilleure précision avec la table $L_{64}(2^{63})$ par rapport à la table $L_{32}(2^{31})$. Ceci est dû également à un nombre plus important de termes X_iX_j considéré dans la table $L_{64}(2^{63})$.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	Δ_{max}	M	σ_r	Δ_{max}	M	σ_r	Δ_{max}	
Taguchi $L_{32}(2^{31})$	631	1,00	0,70	4,10	0,96	0,68	4,10	1,04	0,74	4,21	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{64}(2^{63})$	599	0,80	0,68	2,89	0,72	0,64	2,8	0,73	0,65	2,76	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{81}(3^{40})$	582	0,66	0,59	3,80	0,63	0,57	3,77	0,60	0,55	3,37	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{32}(2^{31})$	612	0,52	0,50	3,03	0,62	0,56	3,1	0,66	0,61	3,53	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{64}(2^{63})$	580	0,18	0,16	1,07	0,25	0,20	1,16	0,24	0,21	2,19	kWh/m ² .an
Box-Behnken	486	0,21	0,17	0,95	0,27	0,21	1,30	0,23	0,21	2,24	kWh/m ² .an
D-optimaux	582	0,24	0,17	1,23	0,29	0,22	1,44	0,24	0,20	2,00	kWh/m ² .an

Tableau 4.5 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences standards pour la détermination des besoins de chauffage pour les climats étudiés

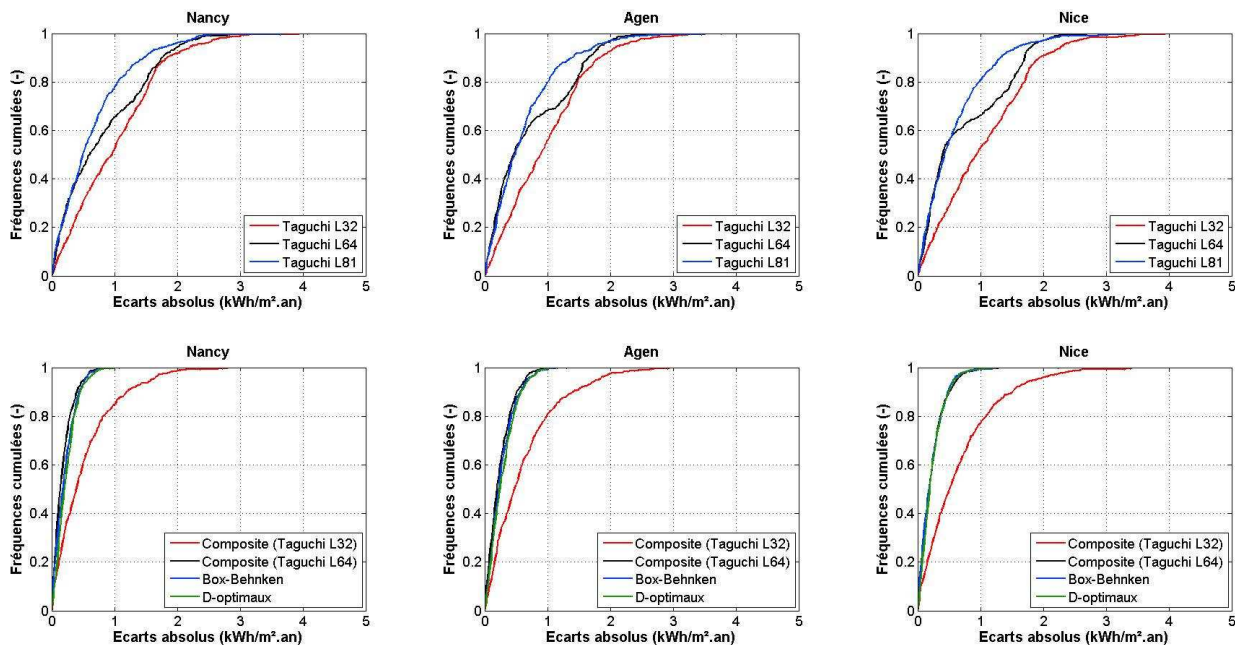


Figure 4.3 : Fréquences cumulées des écarts absolus pour les besoins de chauffage pour les climats étudiés

Le fait que les plans du deuxième degré soient plus précis que les plans du premier degré, signifie a priori qu'il existe des variables à variation non linéaire dans le domaine d'étude. En effet, les termes du second degré permettent de prendre en compte des variations non linéaires de certains paramètres. L'absence de ces termes dans les plans du premier degré dégrade la précision du modèle polynômial.

A titre d'exemple, considérons le facteur inertie thermique (*Inertie*) (voir Figure 4.4). On peut constater que les besoins de chauffage ont une variation non linéaire en fonction de l'inertie avec un minimum au voisinage du niveau Inertie lourde.

On observe donc que plus l'inertie thermique augmente, plus les apports solaires et les gains internes stockés par la structure du bâtiment sont importants et plus les besoins de chauffage en période d'inoccupation diminuent. Cependant, il existe un deuxième phénomène lié à l'augmentation de l'inertie thermique : plus l'inertie augmente, plus les besoins de chauffage pour passer de la température de consigne en inoccupation (16 °C) à la consigne en occupation (19 °C) augmentent. Il s'agit donc de deux phénomènes qui influencent les besoins de chauffage en sens opposé d'où l'existence d'un minimum.

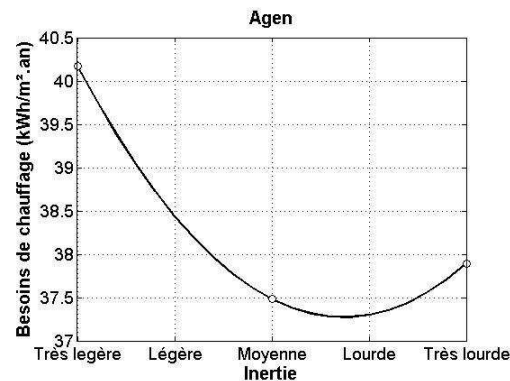


Figure 4.4 : Effet du facteur inertie thermique sur les besoins de chauffage à Agen

Nous avons montré auparavant (voir chapitre 3, §3.2.9) que la précision d'un modèle polynômial n'est pas la même selon l'emplacement dans le domaine d'étude, du point d'expérience pour lequel on calcule la réponse. Il nous semble donc indispensable d'évaluer la qualité de la précision des modèles polynômiaux sur l'ensemble du domaine d'étude et surtout pour des valeurs basses des besoins de chauffage qui correspondent dans notre cas à des solutions optimales.

Ainsi, nous allons considérer un plan du premier degré et un plan du deuxième degré et nous allons analyser leurs écarts absolus en fonction des besoins de chauffage. Soit à titre d'exemple, le plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$ et le plan de Box-Behnken (voir Figure 4.5). Le plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$ présente la meilleure précision parmi les plans du premier degré, le plan de Box-Behnken présente également une précision parmi les meilleures obtenues avec les plans du deuxième degré. Les écarts de la Figure 4.5 sont donnés pour 290 points d'expériences aléatoirement repartis dans tout le domaine d'étude et ne faisant pas partie d'aucun des sept plans d'expériences standards utilisés.

Il est facile de constater que le plan de Box-Behnken a une précision nettement meilleure que celle du plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$. Cependant, la précision se dégrade légèrement pour des valeurs basses des besoins de chauffage, ce qui peut être risqué dans le cas où l'on recherche des solutions dans cette région. Il nous semble donc nécessaire de développer une méthodologie permettant d'améliorer la précision des modèles polynômiaux, dans le cas où la précision obtenue par ces modèles est jugée non satisfaisante par l'expérimentateur.

Cette méthodologie permet d'adapter la méthode des plans d'expériences au problème que l'on souhaite résoudre tout en garantissant un niveau de précision acceptable.

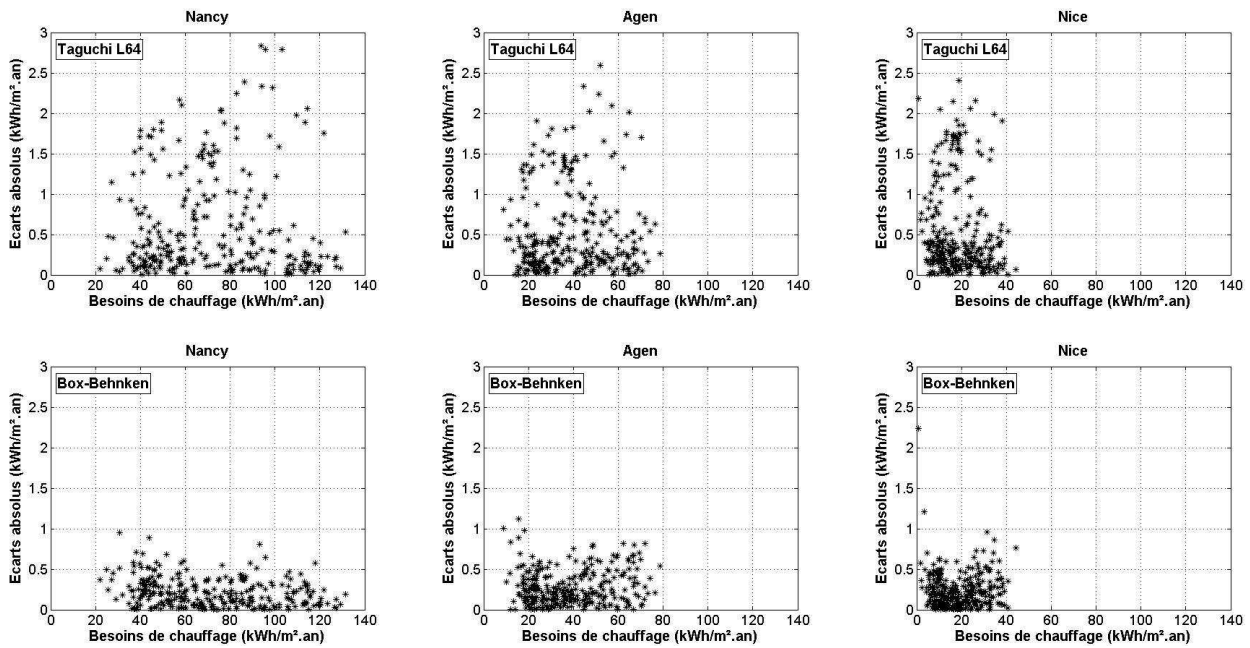


Figure 4.5 : Ecart absolu des besoins de chauffage pour les plans de Taguchi $L_{64}(2^{63})$ et de Box-Behnken pour les climats étudiés

Nous avons commencé le développement de cette méthodologie en analysant les éventuelles causes des incertitudes sur les résultats d'un modèle polynômial. A part la position du point d'expérience pour lequel la réponse est calculée, les incertitudes peuvent être dues à trois causes, à savoir (voir chapitre 3, §3.2.9) :

- L'incertitude expérimentale. Cela signifie que si l'on mesure plusieurs fois une réponse pour une même expérimentation il est possible que l'on n'obtienne pas exactement le même résultat.
- L'emplacement des points d'expériences : l'emplacement des points expérimentaux génère également des erreurs plus ou moins élevées sur les coefficients du modèle polynômial.
- L'incertitude d'ajustement. Il est possible que le modèle choisi à priori soit différent du modèle réel du système étudié. Ceci engendre des écarts sur les coefficients du polynôme.

La simulation numérique n'engendre pas d'incertitudes expérimentales. En effet, une simulation numérique avec les mêmes entrées et les mêmes valeurs des paramètres donne une valeur unique de la réponse. De plus, les plans d'expériences du deuxième degré D-optimaux, Box-Behnken et composite $L_{64}(2^{63})$ ont des niveaux de précision très proches et un emplacement de points d'expériences différents, ce qui montre que le manque de précision n'est pas non plus lié à l'emplacement des points d'expériences. Le manque de précision est donc essentiellement lié au modèle polynômial choisi. Ainsi, une amélioration de la précision impose une modification du modèle.

Nous rappelons que les polynômes standards utilisés par les plans d'expériences sont issus d'un développement en série limité de Taylor de la fonction $Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, x_n)$. Il existe des termes dans le développement de Taylor qui ne sont pas pris en compte dans les polynômes des plans d'expériences. L'introduction de ces termes dans le polynôme doit logiquement améliorer la précision.

La recherche de ces termes peut être réalisée de façon itérative en commençant par exemple à introduire des termes de la forme $X_i X_j X_k$, et ne garder que ceux qui améliorent la précision, ensuite passer à des termes de la forme $X_i X_j X_k X_m$ puis $X_i X_j^2$, et ainsi de suite.

Dans notre cas, nous avons réussi à améliorer la précision des modèles polynômiaux en introduisant des termes de la forme $X_i X_j X_k$. L'expression générale de ces polynômes devient alors :

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i X_i + \sum_{i,j}^{\frac{n-1}{2}} a_{ij} X_i X_j + \sum_i^n a_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j,k} a_{ijk} X_i X_j X_k \quad (4.2)$$

Afin de pouvoir déterminer les coefficients des nouveaux polynômes avec une précision acceptable et un minimum d'expériences, nous avons défini de nouveaux plans d'expériences qui permettent de bien couvrir le domaine expérimental tout en minimisant le nombre d'expériences nécessaire. Ces nouveaux plans d'expériences sont obtenus en couplant plusieurs plans standards du premier et du second degré.

Considérons à titre d'exemple, le couplage d'un plan fractionnaire à 2 niveaux avec un plan de Box-Behnken. Supposons que le domaine d'étude soit un cube. Un plan fractionnaire à 2 niveaux consiste à placer les points d'expériences sur quatre des huit sommets du cube. Un plan de Box-Behnken consiste à placer les points d'expériences sur les milieux des arêtes et au centre du cube. Cette technique permet de bien couvrir le domaine expérimental et d'obtenir une bonne précision pour les coefficients du polynôme. Le couplage peut éventuellement comprendre des plans composites (voir Figure 4.6).

On peut également envisager de coupler un plan fractionnaire à 2 niveaux avec un ou plusieurs plans fractionnaires à 3 niveaux comme les tables $L_{81}(3^{40})$ et $L_{27}(3^{13})$ dont les points d'expériences sont situés, à l'instar d'un plan de Box-Behnken, aux sommets et aux milieux des arêtes du domaine expérimental.

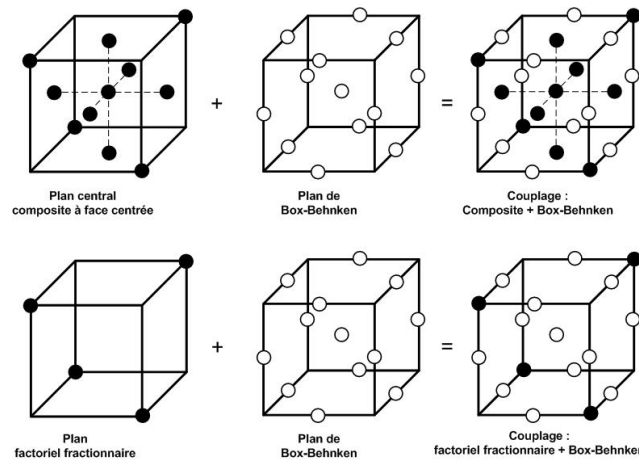


Figure 4.6 : Méthodologie de couplage de plusieurs plans d'expériences

Pour pouvoir prendre en compte des variations du 3^{ème} ou du 4^{ème} degré d'un paramètre donné, celui-ci doit avoir respectivement quatre ou cinq niveaux. En effet, pour calculer les coefficients de la fonction du 4^{ème} degré $Y = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4$, on a besoin de cinq points différents. Il s'agit donc d'introduire 1 ou 2 niveaux supplémentaires pour le paramètre en question aux trois niveaux que comprend déjà le plan du second degré, ce qui signifie des expériences supplémentaires. A l'instar d'un plan composite, on peut représenter les expériences supplémentaires par des points situés sur les axes de coordonnées du domaine d'étude.

Considérons à titre d'exemple, un plan à deux facteurs. Le domaine d'étude est un carré (voir Figure 4.7). Un plan factoriel du deuxième degré consiste à placer les points d'expériences sur les sommets, les milieux des côtés et le centre du carré (cercles pleins). Pour pouvoir prendre en compte des variations du 4^{ème} degré, on peut placer des points d'expériences supplémentaires sur les axes de coordonnées à égale distance du centre et

des niveaux hauts et bas respectivement (cercles vides, niveaux -0,5 et +0,5). Cette logique peut être appliquée également pour des plans d'expériences à plus de 2 facteurs.

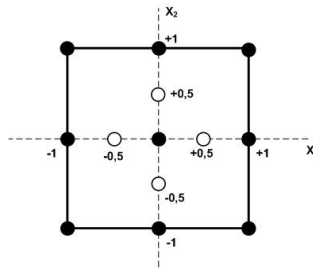


Figure 4.7 : Exemple d'un plan du 4^{ème} degré

Pour calculer les coefficients des nouveaux modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage, nous avons mis en œuvre les couplages suivants :

- Couplage 1 : plan de Box-Behnken + Taguchi $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$. Le nombre total de simulations à effectuer est de 322.
- Couplage 2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$. Le nombre total de simulations à effectuer est de 373.

La Figure 4.8 montre les écarts absolus des besoins de chauffage, pour les 290 points d'expériences, obtenus pour les plans de couplage 1 et 2.

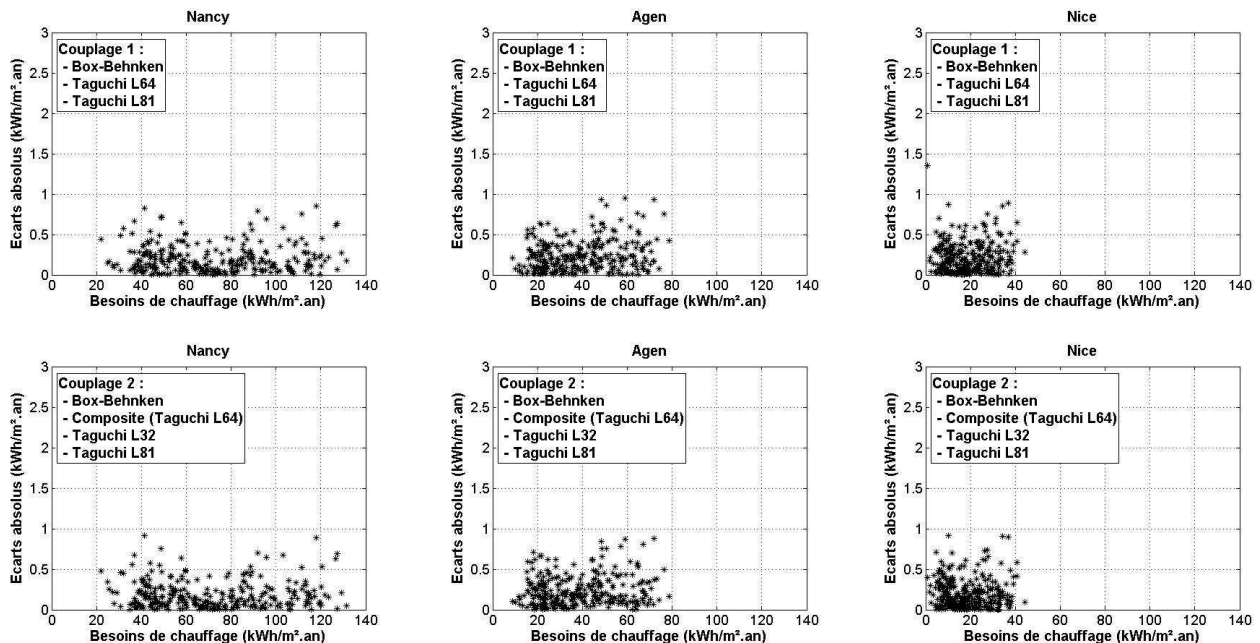


Figure 4.8 : Ecarts absolus des besoins de chauffage pour les plans d'expériences de couplage les climats étudiés

Le Tableau 4.7 donne les valeurs de M , σ_r et $\Delta_{\max}$ pour les plans d'expériences de couplage.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Couplage 1	290	0,20	0,17	0,85	0,24	0,19	0,95	0,21	0,19	1,35	kWh/m².an
Couplage 2	290	0,19	0,16	0,91	0,23	0,18	0,88	0,20	0,18	0,92	kWh/m².an

Tableau 4.6 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences de couplage pour la modélisation des besoins de chauffage pour les climats étudiés

La méthodologie que nous avons développée a permis d'améliorer la qualité des modèles polynômiaux. En effet, en comparant la Figure 4.8 à la Figure 4.5, on peut constater que les écarts obtenus pour des faibles besoins de chauffage sont réduits grâce aux plans de couplage 1 et 2. Ces écarts sont plus uniformes sur la plage de variation des besoins de chauffage ce qui garantit un niveau de précision équivalent dans tout le domaine d'étude.

De plus, en comparant le Tableau 4.7 et le Tableau 4.5, on peut constater une légère réduction dans les valeurs de M et σ_r , et une nette réduction dans les écarts maximaux $\Delta_{\max}$ et plus particulièrement pour Nice, dont les besoins de chauffage sont les plus faibles et donc les plus concernés par cette amélioration.

Globalement, l'amélioration de la précision entre les deux plans de couplage est limitée, ce qui montre qu'il n'est pas nécessaire de coupler automatiquement un grand nombre de plans pour avoir une bonne précision sur les coefficients du nouveau modèle polynômial. Dans ce but, nous allons définir, à la fin de cette section, une méthodologie séquentielle pour le couplage de plans d'expériences.

Les modèles polynômiaux du plan de couplage n°2 présentant la meilleure précision par rapport à la simulation numérique, il sera donc utilisé pour rechercher des solutions basse consommation pour le bâtiment Beethoven.

4.1.5 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement

Par analogie aux besoins de chauffage, pour chaque plan d'expériences nous effectuons une comparaison entre les besoins de rafraîchissement obtenus par le modèle polynômial et ceux obtenus par la simulation numérique. Le nombre total de simulations numériques pour chaque climat est de 671.

La Figure 4.9 montre les résultats obtenus pour le climat d'Agen. Chaque modèle polynômial est bien entendu comparé à des simulations numériques qui n'ont pas été utilisées pour déterminer ses coefficients.

La meilleure précision est obtenue avec les plans du deuxième degré D-optimaux, Box-Behnken et composite $L_{64}(2^{63})$, dont le niveau de précision est très proche. La moyenne des écarts absolus observés sur ces plans varie entre 0,56 kWh/m².an et 1,19 kWh/m².an. Les valeurs de l'écart-type montrent que les écarts absolus sont majoritairement inférieurs ou égaux à 2,16 kWh/m².an. L'écart maximal atteint est de 7,65 kWh/m².an.

Les autres plans d'expériences sont moins précis, la moyenne des écarts absolus varie entre 1,15 kWh/m².an et 2,23 kWh/m².an, avec des écarts majoritairement inférieurs à 3,81 kWh/m².an. De plus, l'écart maximal obtenu est de 9,15 kWh/m².an.

La Figure 4.10 montre les écarts absolus entre les modèles polynômiaux et la simulation numérique en fonction des besoins de rafraîchissement pour le plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$ et composite $L_{64}(2^{63})$, pour 290 points d'expériences aléatoire.

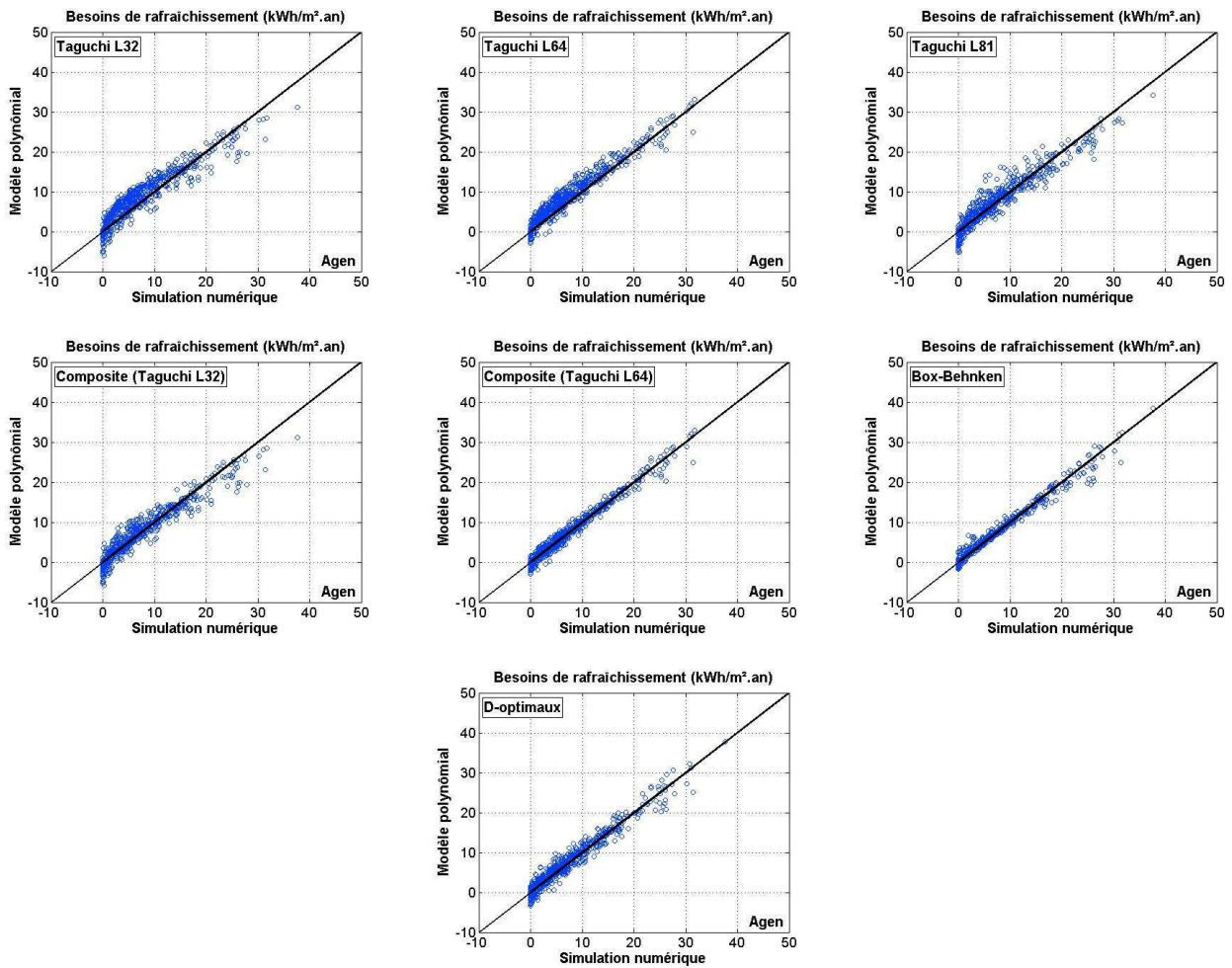


Figure 4.9 : Comparaison modèle polynômial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement à Agen

Le Tableau 4.7 donne, les valeurs de n , M , σ_r et $\Delta_{\max}$ pour les différents modèles polynômiaux.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Taguchi $L_{32}(2^{31})$	639	1,62	1,14	6,95	2,22	1,52	8,34	2,23	1,58	8,33	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{64}(2^{63})$	607	1,30	0,94	5,43	1,84	1,30	6,54	1,83	1,30	5,89	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{81}(3^{40})$	590	1,15	1,07	5,85	1,59	1,48	8,80	1,65	1,52	9,15	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{32}(2^{31})$	616	1,12	1,15	7,01	1,42	1,45	8,42	1,43	1,46	8,47	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{64}(2^{63})$	584	0,62	0,58	5,52	0,81	0,75	6,63	0,84	0,72	5,61	kWh/m ² .an
Box-Behnken	494	0,56	0,74	6,25	0,75	0,92	6,63	0,78	0,98	7,65	kWh/m ² .an
D-optimaux	590	0,83	0,70	5,15	1,19	0,97	6,35	1,07	0,88	6,14	kWh/m ² .an

Tableau 4.7 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences standards pour la modélisation des besoins de rafraîchissement pour les climats étudiés

La précision du plan composite $L_{64}(2^{63})$ est meilleure que celle de Taguchi $L_{64}(2^{63})$. Toutefois, les écarts obtenus sont non négligeables et plus particulièrement au voisinage de zéro. De plus, on constate que la précision des modèles n'est pas uniforme sur tout le domaine d'étude. Il s'avère donc nécessaire d'améliorer la qualité des modèles polynômiaux à l'aide de la méthodologie développée précédemment lors de l'analyse pour les besoins de chauffage (voir §4.1.4).

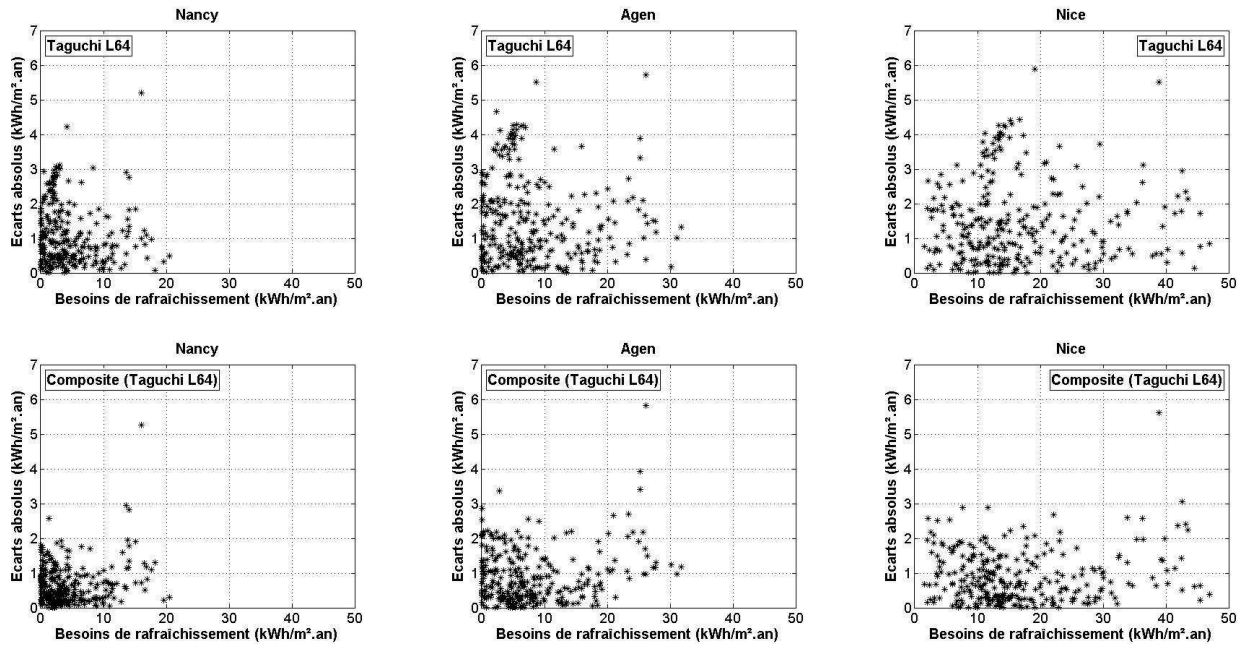


Figure 4.10 : Ecart absolu des besoins de rafraîchissement pour le plan composite $L_{64}(2^{63})$ les climats étudiés

Nous sommes parvenu à améliorer de manière significative la précision des modèles polynômiaux en introduisant des termes de la forme $X_i X_j X_k$, et $X_i X_j^2$. L'expression générale de ces polynômes est :

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i X_i + \sum_{i,j}^{n-1} a_{ij} X_i X_j + \sum_i^n a_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j,k} a_{ijk} X_i X_j X_k + \sum_{i,j} a_{ijj} X_i X_j^2 \quad (4.3)$$

Afin de calculer les coefficients des nouveaux polynômes des besoins de rafraîchissement, nous avons mis en œuvre deux couplages :

- Couplage 1 : plan composite $L_{64}(2^{63})$ + plan $L_{32}(2^{31})$ + plan $L_{81}(3^{40})$. Le nombre total de simulations à effectuer est de 200.
- Couplage 2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$. Le nombre total de simulations à effectuer est de 377.

Comme pour les plans d'expériences standards, nous présentons pour les deux plans de couplage, une comparaison entre les besoins de rafraîchissement obtenus par le modèle polynômial et ceux obtenus par les simulations numériques pour Agen (voir Figure 4.11). De plus, nous présentons la moyenne M , l'écart-type σ_r et l'écart maximal $\Delta_{\max}$ obtenus pour ces deux plans (voir Tableau 4.8) ainsi que les écarts absolus entre les modèles polynômiaux et la simulation numérique en fonction des besoins de rafraîchissement pour le mêmes points d'expériences que ceux de la Figure 4.10 (voir Figure 4.12).

En comparant les résultats obtenus pour les plans standards avec ceux des plans de couplage, on peut constater que les modèles polynômiaux obtenus pour ces derniers sont d'une meilleure qualité que ceux des plans standards. En effet, la moyenne M , l'intervalle de variation $M + \sigma_r$ et l'écart maximal $\Delta_{\max}$ sont réduits. De plus, la répartition des écarts dans le domaine d'étude est plus uniforme. Enfin, la précision est particulièrement améliorée pour des faibles besoins de rafraîchissement qui constitue la partie du domaine d'étude à laquelle nous allons nous intéresser pour concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie. Il est à noter que la précision obtenue avec le premier plan de couplage est meilleure que celle obtenue avec le deuxième.

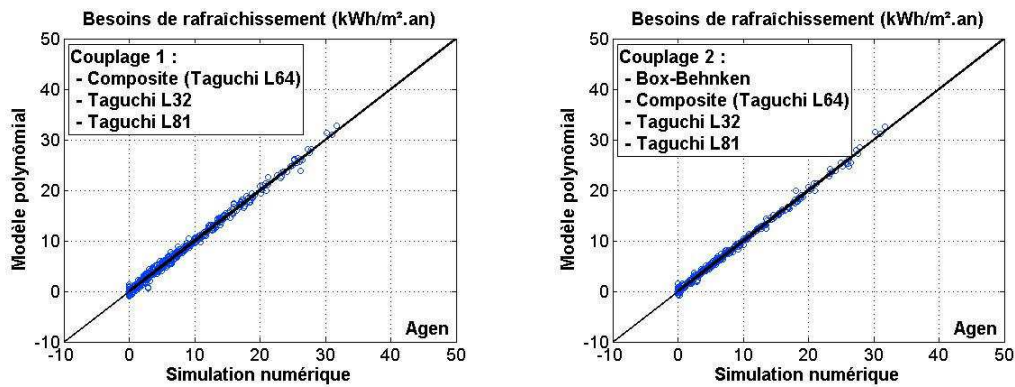


Figure 4.11 : Comparaison modèle polynômial / simulation numérique pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement à Agen

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Couplage 1	471	0,37	0,33	2,49	0,39	0,34	2,38	0,49	0,42	2,35	kWh/m ² .an
Couplage 2	294	0,29	0,27	2,00	0,30	0,28	1,82	0,39	0,34	2,02	kWh/m ² .an

Tableau 4.8 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences de couplage pour la détermination des besoins de rafraîchissement pour les climats étudiés

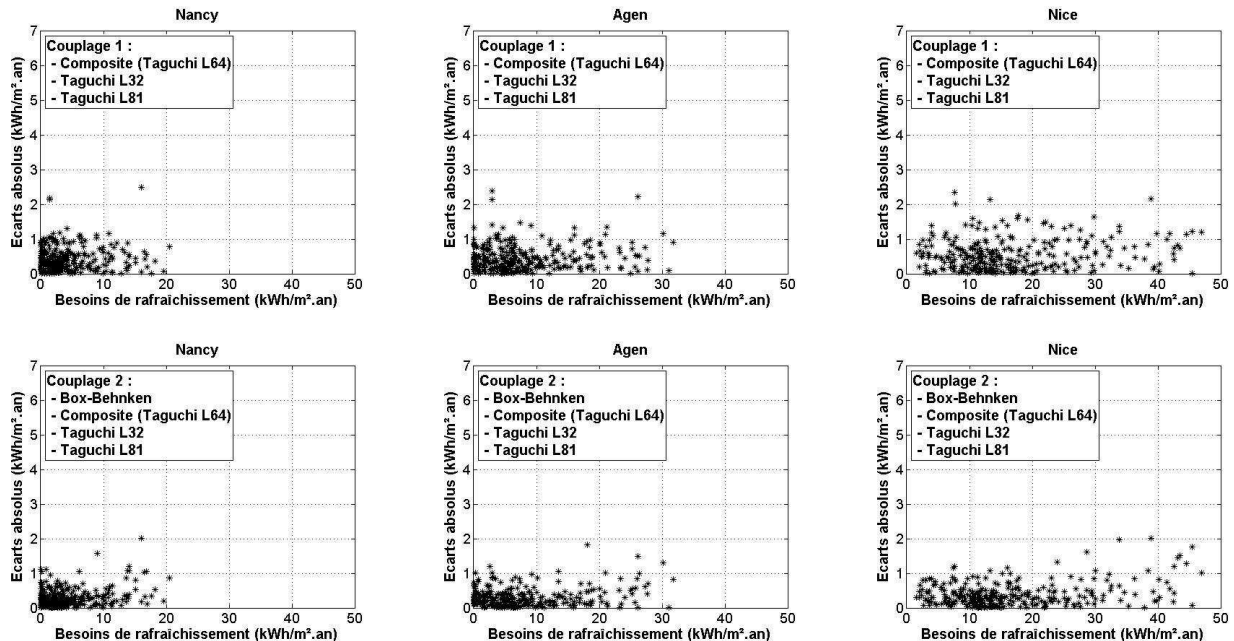


Figure 4.12 : Ecarts absolus des besoins de rafraîchissement pour les climats étudiés

Il est à noter que vu le niveau de précision constaté sur les plans d'expériences standards, il nous semble que leur utilisation pour réaliser des études d'optimisation n'est pas sans risque. Ce manque de précision est dû au fait que le modèle réel régissant la variation des besoins de rafraîchissement est différent des modèles polynômiaux standards que préconisent les divers plans d'expériences. Les raisons essentielles sont un domaine d'étude très large avec des paramètres à variations importantes et un nombre élevé de variables (11 facteurs) avec certaines qui sont à évolution non linéaire (voir Figure 4.13).

Nous avons pu constater que la précision peut être améliorée grâce à la méthodologie que nous avons développée qui consiste d'une part, à introduire de nouveaux termes dans le polynôme; et d'autre part à coupler plusieurs plans d'expériences afin de bien répartir les points d'expériences dans le domaine d'étude et obtenir ainsi une bonne précision sur les coefficients du modèle polynômial avec un minimum d'expériences.

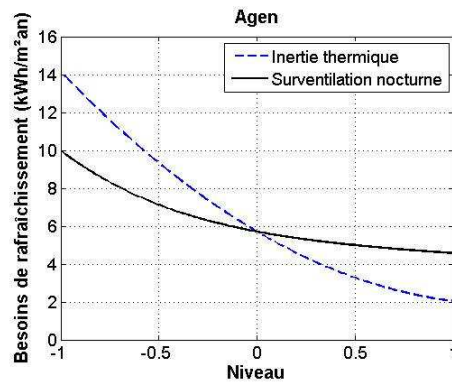


Figure 4.13 : Effet des facteurs inertie thermique et surventilation nocturne sur les besoins de rafraîchissement à Agen

Enfin, nous allons utiliser pour la recherche de solutions basse consommation pour le bâtiment Beethoven, le plan de couplage n°2 qui présente la meilleure précision parmi les différents modèles développés pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement.

4.1.6 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment

A l'instar des besoins de chauffage et de rafraîchissement, nous présentons une comparaison entre la consommation d'énergie finale annuelle obtenue par les modèles polynômiaux des plans d'expériences standards et celle obtenue par la simulation numérique (voir Figure 4.14).

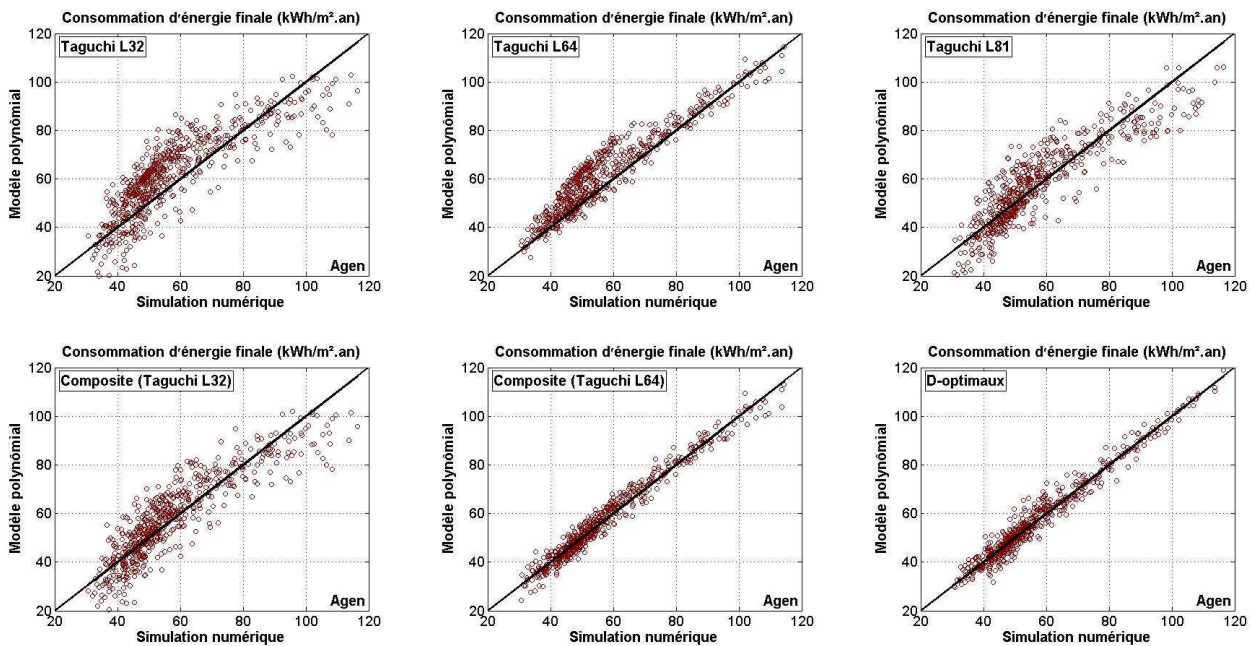


Figure 4.14 : Comparaison modèle polynômial / simulation numérique pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle à Agen

Le nombre de points d'expériences de comparaison n pour chaque plan d'expériences est donné dans le Tableau 4.9 ainsi que les valeurs de la moyenne M , l'écart-type σ_r , et l'écart maximal $\Delta_{\max}$.

La Figure 4.15 montre les écarts absolus entre les modèles polynômiaux et la simulation numérique en fonction de la consommation d'énergie finale annuelle pour le plan composite $L_{64}(2^{63})$.

Les modèles polynômiaux des plans du deuxième degré D-optimaux et composite $L_{64}(2^{63})$ donnent une précision meilleure que celle des autres plans. Néanmoins, ce niveau de précision ne nous semble pas satisfaisant car les écarts par rapport à la simulation numérique restent considérables avec des valeurs maximales allant de 9,83 kWh/m².an à 13,24 kWh/m².an. De plus, en analysant les écarts absolus des autres plans d'expériences, on peut constater facilement que le niveau de précision est médiocre.

Ce manque de précision est principalement dû à un nombre important de facteurs (13 facteurs) dont certains sont à variation importante et non linéaire (voir Figure 4.16).

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Taguchi $L_{32}(2^{31})$	647	13,29	8,59	43,64	8,73	5,70	30,05	6,62	4,38	24,04	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{64}(2^{63})$	615	8,37	7,89	30,35	5,86	4,79	18,57	5,19	3,53	17,21	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{81}(3^{40})$	598	8,68	7,35	35,31	6,00	5,03	24,71	4,61	3,91	20,72	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{32}(2^{31})$	620	9,09	7,82	44,05	6,07	5,25	30,28	4,37	3,87	23,78	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{64}(2^{63})$	588	2,97	2,53	13,24	2,34	1,89	9,83	2,40	2,05	12,75	kWh/m ² .an
D-optimaux	609	2,91	2,89	18,15	2,33	2,30	12,61	2,01	1,96	10,74	kWh/m ² .an

Tableau 4.9 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences standards pour la détermination de la consommation d'énergie finale annuelle pour les climats étudiés

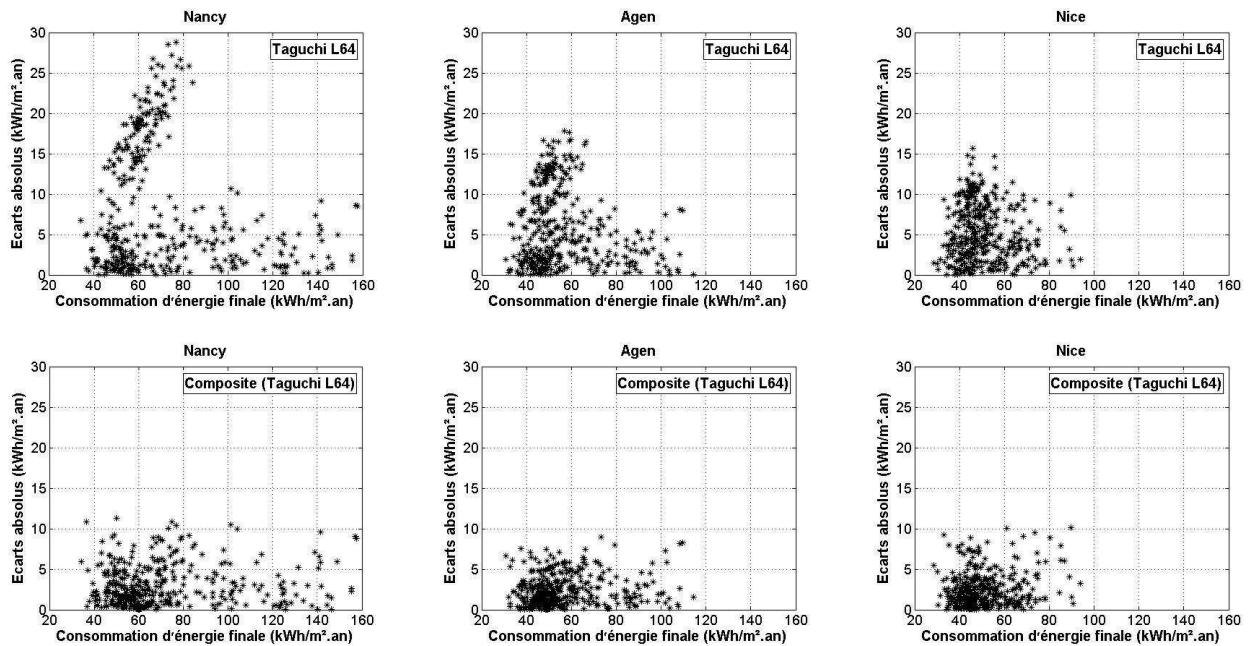


Figure 4.15 : Ecart absolu des besoins de la consommation d'énergie finale annuelle pour le plan composite $L_{64}(2^{63})$ pour les climats étudiés

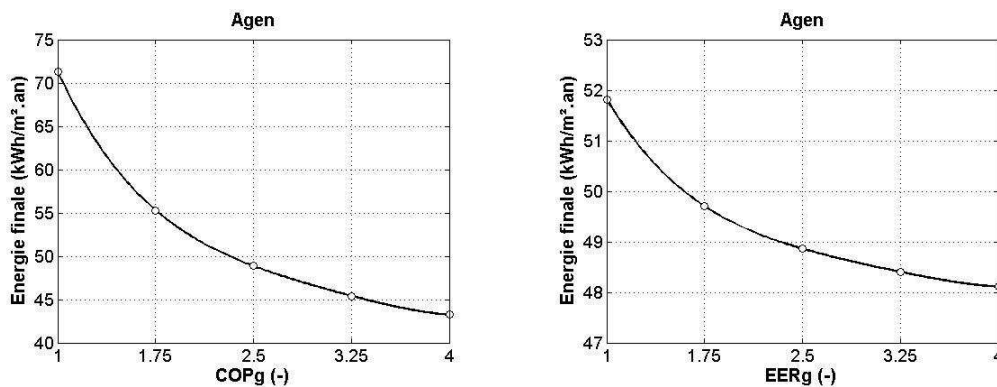


Figure 4.16 : Effets des facteurs COP_g et EER_g sur la consommation d'énergie finale annuelle à Agen (les autres facteurs sont au niveau 0)

Nous avons donc eu recours au couplage de plusieurs plans d'expériences, à savoir un plan composite $L_{64}(2^{63})$, un plan $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi, et deux plans $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi soit au total 285 simulations. Ensuite, nous avons introduit dans le polynôme des termes de la forme $X_i X_j X_k$, $X_i X_j^2$, $X_i X_j X_k^2$, X_k^3 et X_k^4 qui ont amélioré considérablement sa précision et qui ont été identifiés par itérations.

La Figure 4.17 montre une comparaison entre la consommation d'énergie annuelle calculée à l'aide du polynôme et celle obtenue par la simulation numérique pour 394 points d'expériences repartis sur tout le domaine d'étude, pour les trois climats considérés. La Figure 4.18 montre les écarts absolus pour la consommation d'énergie annuelle pour les trois climats. Le Tableau 4.10 montre, les valeurs de n , M , σ_r , et $\Delta_{\max}$.

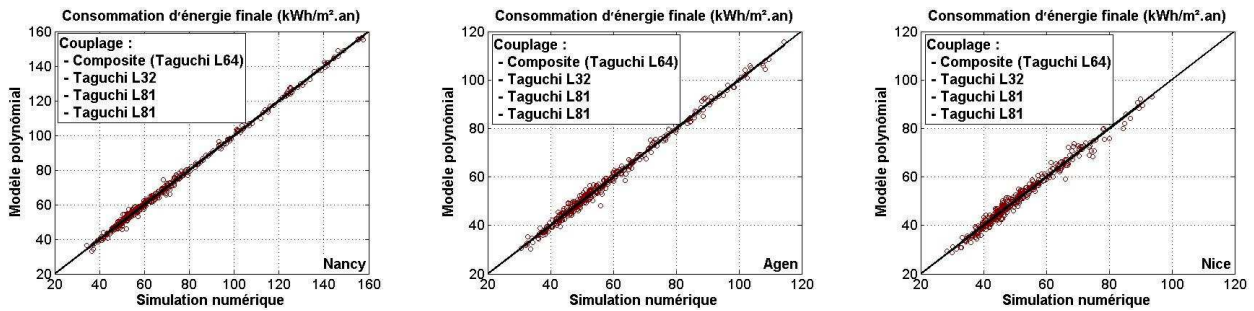


Figure 4.17 : Comparaison modèle polynômial / simulation numérique pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle pour les trois climats étudiés

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Couplage	394	0,95	0,92	6,05	0,99	0,95	7,80	1,20	1,11	7,03	kWh/m².an

Tableau 4.10 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences de couplage pour la détermination des besoins de rafraîchissement pour les climats étudiés

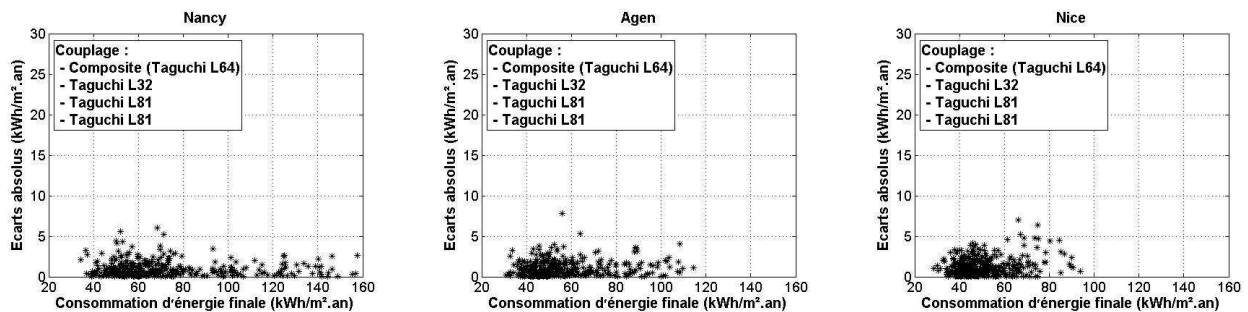


Figure 4.18 : Ecart absolu de la consommation d'énergie finale annuelle pour le plan de couplage pour les climats étudiés

On peut constater une nette amélioration de la précision des modèles polynômiaux. La moyenne des écarts absolus varie maintenant entre 0,95 et 1,2 kWh/m².an. Les écarts sont majoritairement inférieurs à 2,21 kWh/m².an et les écarts maximaux varient de 6,05 kWh/m².an à 7,03 kWh/m².an. Ce plan sera par la suite utilisé pour rechercher des solutions basse consommation pour le bâtiment Beethoven.

Il est parfois possible de transformer la variation non linéaire de la réponse par rapport à un facteur donné en une variation linéaire, en effectuant une modification de ce facteur. Considérons à titre d'exemple, les facteurs COP_g et EER_g . Nous avons montré que la consommation d'énergie finale annuelle a une variation non linéaire par rapport à ces deux facteurs (voir Figure 4.16). La cause de cette variation non linéaire peut être mise en évidence, en écrivant l'expression de la consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g :

$$C_F = \frac{B_{\text{chauffage}}}{COP_g} + \frac{B_{\text{rafraichissement}}}{EER_g} + C_{\text{autres}} \quad (4.4)$$

Avec :

C_F consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment, (kWh/m².an)
 $B_{\text{chauffage}}$ besoins de chauffage du bâtiment, (kWh/m².an)
 $B_{\text{rafraichissement}}$ besoins de rafraîchissement du bâtiment, (kWh/m².an)
 C_{autres} autres consommations d'énergie finale (éclairage artificiel, bureautique, auxillaires de ventilation mécanique), (kWh/m².an)

Le fait que COP_g et EER_g soient au dénominateur dans l'équation (4.4) se traduit par une variation non linéaire de la consommation d'énergie finale annuelle, en fonction de ces deux facteurs.

En revanche, cette variation est linéaire en fonction de $1/COP_g$ et $1/EER_g$. Ainsi, en remplaçant dans le plan d'expériences les facteurs COP_g et EER_g respectivement par, $1/COP_g$ et $1/EER_g$, la variation non linéaire de la consommation d'énergie finale annuelle devient linéaire, ce qui va améliorer essentiellement la précision des plans du premier degré (voir Figure 4.19).

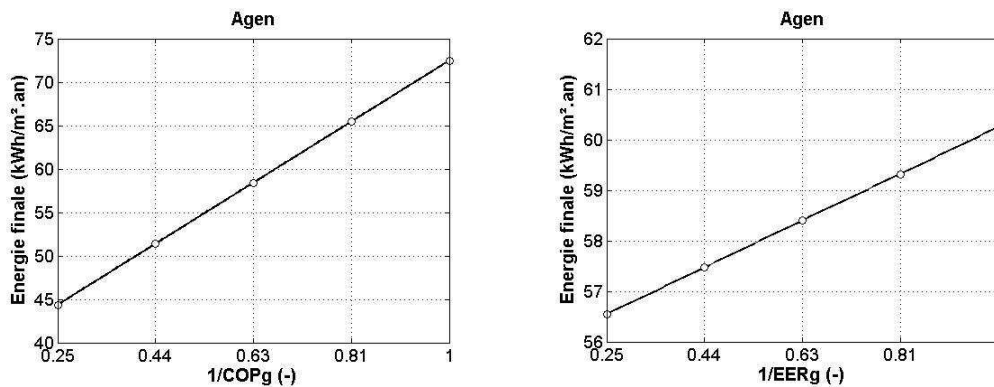


Figure 4.19 : Effets des facteurs $1/COP_g$ et $1/EER_g$ sur la consommation d'énergie finale annuelle à Agen (les autres facteurs sont au niveau 0)

Le Tableau 4.11 donne la notation en variable centrée réduite des facteurs $1/COP_g$ et $1/EER_g$, ainsi que leurs cinq niveaux respectifs.

Facteur	Notation en coordonnées centrées réduites	Niveau					Unité
		(-1)	(-0,5)	(0)	(+0,5)	(+1)	
$1/COP_g$	X_{12}	0,25	0,44	0,63	0,81	1,00	-
$1/EER_g$	X_{13}	0,25	0,44	0,63	0,81	1,00	-

Tableau 4.11 : Facteurs $1/COP_g$ et $1/EER_g$ du plan d'expériences pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle

Le Tableau 4.12 donne, les valeurs de n , M , σ_r et $\Delta_{\max}$ pour les différents modèles polynômiaux issus des plans d'expériences standards du premier et du deuxième degré en utilisant les facteurs $1/COP_g$ et $1/EER_g$.

Sur la Figure 4.20, nous avons porté les écarts absolus pour la consommation d'énergie finale annuelle pour les plans Taguchi $L_{64}(2^{63})$, composite $L_{64}(2^{63})$ et D-optimaux, pour 394 points d'expériences.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Taguchi $L_{32}(2^{31})$	647	8,71	7,56	43,49	5,90	4,92	29,92	4,54	3,63	24,78	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{64}(2^{63})$	615	2,52	1,92	11,37	2,39	1,68	12,01	2,61	1,95	16,44	kWh/m ² .an
Taguchi $L_{81}(3^{40})$	598	7,46	7,18	41,05	5,04	4,78	27,32	3,88	3,71	23,08	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{32}(2^{31})$	620	8,83	7,72	43,40	5,83	5,10	29,88	4,31	3,82	24,83	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi $L_{64}(2^{63})$	588	2,22	2,05	11,64	1,87	1,75	12,14	2,10	2,02	16,52	kWh/m ² .an
D-optimaux	609	2,04	1,92	12,67	1,81	1,69	11,24	1,66	1,57	9,13	kWh/m ² .an

Tableau 4.12 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences standards pour la détermination de la consommation d'énergie finale annuelle pour les climats étudiés

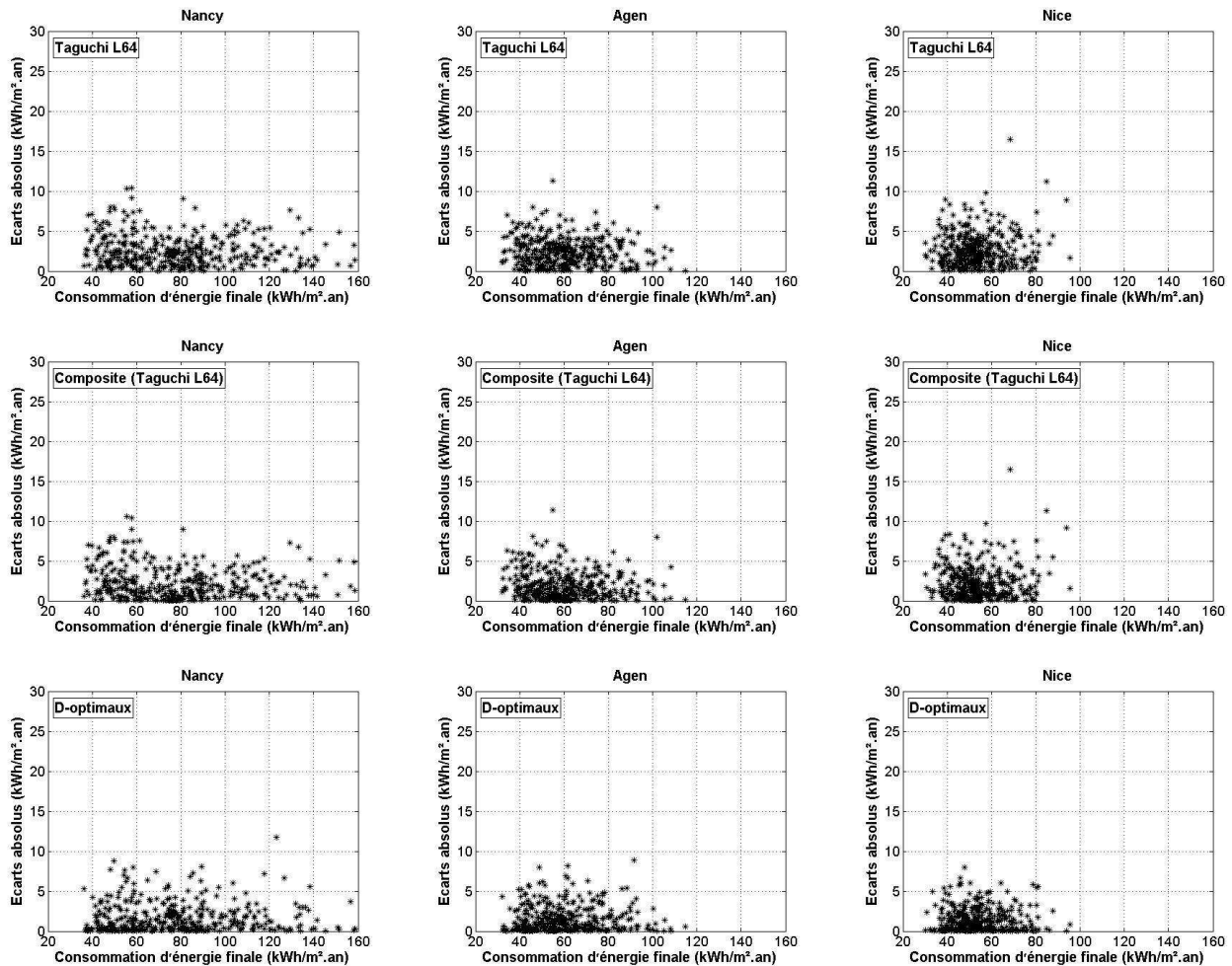


Figure 4.20 : Ecart absolu de la consommation d'énergie finale annuelle pour les climats étudiés

La précision des plans d'expériences s'est améliorée à l'exception des plans Taguchi $L_{32}(2^{31})$ et Taguchi $L_{81}(3^{40})$, à cause d'un nombre limité d'interactions (termes $X_i X_j$ dans le polynôme) pris en compte. La précision du plan du premier degré Taguchi $L_{64}(2^{63})$ s'est nettement améliorée et est devenue proche de celle des plans du deuxième degré, D-optimaux et composite $L_{64}(2^{63})$.

4.1.7 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation du confort thermique d'été

Deux réponses ont été définies pour évaluer le confort thermique d'été, à savoir la somme des degrés-heures $\sum DH$ et le nombre d'heures nb-h de dépassement de 26 °C.

Avant de réaliser les simulations nécessaires pour la détermination des modèles polynômiaux, nous avons vérifié qu'il existe bien une corrélation entre chaque réponse et les facteurs étudiés. Nous montrons à titre d'exemple, la variation de $\sum DH$ en fonction du

facteur *Surventil* et la variation de nb-h en fonction du facteur *FS* (voir Figure 4.21 et Figure 4.22), les autres facteurs étant fixés à leur niveau 0. On constate qu'il existe effectivement une corrélation entre les réponses et les facteurs considérés.

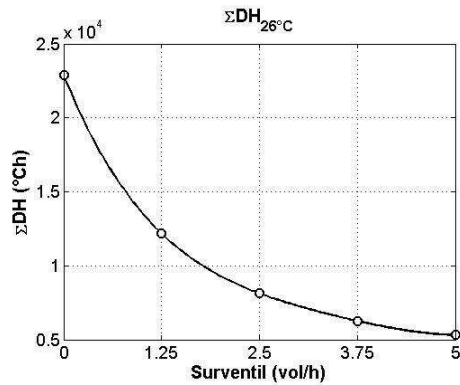


Figure 4.21 : Variation du nombre de degrés-heures de rafraîchissement en fonction de la surventilation nocturne à Agen

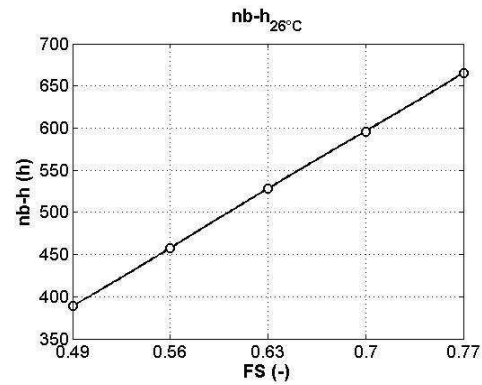


Figure 4.22 : Variation du nombre d'heures de rafraîchissement en fonction du facteur solaire des baies vitrées à Agen

Les Tableau 4.13 et Tableau 4.14 sont portés la moyenne M , l'écart-type σ_r , et la valeur maximale $\Delta_{\max}$ des écarts absolus entre la simulation numériques et les modèles polynômiaux, ainsi que le nombre de points d'expériences pour chaque plan d'expériences.

La Figure 4.23 montre les écarts absolus entre les modèles polynômiaux et la simulation numérique pour le plan composite $L_{64}(2^{63})$. Le nombre de points de comparaison est égal à 81.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Taguchi $L_{32}(2^{31})$	448	6635	5216	40669	10582	7764	59651	12715	9672	67578	°C.h
Taguchi $L_{64}(2^{63})$	416	6082	4395	23091	9866	7064	33187	11458	8190	38397	°C.h
Taguchi $L_{81}(3^{40})$	399	4834	5063	45747	7748	7700	61524	9854	9393	80448	°C.h
Composite + Taguchi $L_{32}(2^{31})$	425	4596	5245	41340	6651	7592	60655	8232	9287	68689	°C.h
Composite + Taguchi $L_{64}(2^{63})$	393	3462	3114	23875	5115	4598	32070	6118	5246	34475	°C.h
Box-Behnken	303	2972	4637	40387	4502	6335	51567	5195	7408	57614	°C.h
D-optimaux	399	4810	4029	26297	6690	5592	35364	7874	6218	37170	°C.h

Tableau 4.13 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences standards pour la détermination de la réponse ΣDH_{26} pour les climats étudiés

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Taguchi $L_{32}(2^{31})$	448	87,4	63,4	365,7	91,5	72,9	361,2	80,3	55,5	311,6	h
Taguchi $L_{64}(2^{63})$	416	94,3	63,6	340,0	77,6	57,9	287,4	59,6	43,7	314,7	h
Taguchi $L_{81}(3^{40})$	399	60,0	67,1	513,8	76,8	75,2	479,4	56,6	53,0	302,6	h
Composite + Taguchi $L_{32}(2^{31})$	425	51,3	51,9	370,1	56,9	52,4	324,5	58,3	47,9	301,4	h
Composite + Taguchi $L_{64}(2^{63})$	393	55,1	48,4	341,7	50,0	37,6	191,9	35,2	34,6	316,2	h
Box-Behnken	303	47,5	59,3	359,9	48,9	54,5	325,9	37,3	38,0	209,2	h
D-optimaux	399	79,9	70,8	357,7	67,4	52,7	369,3	49,9	40,9	311,1	h

Tableau 4.14 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences standards pour la détermination de la réponse nb-h₂₆ pour les trois climats étudiés

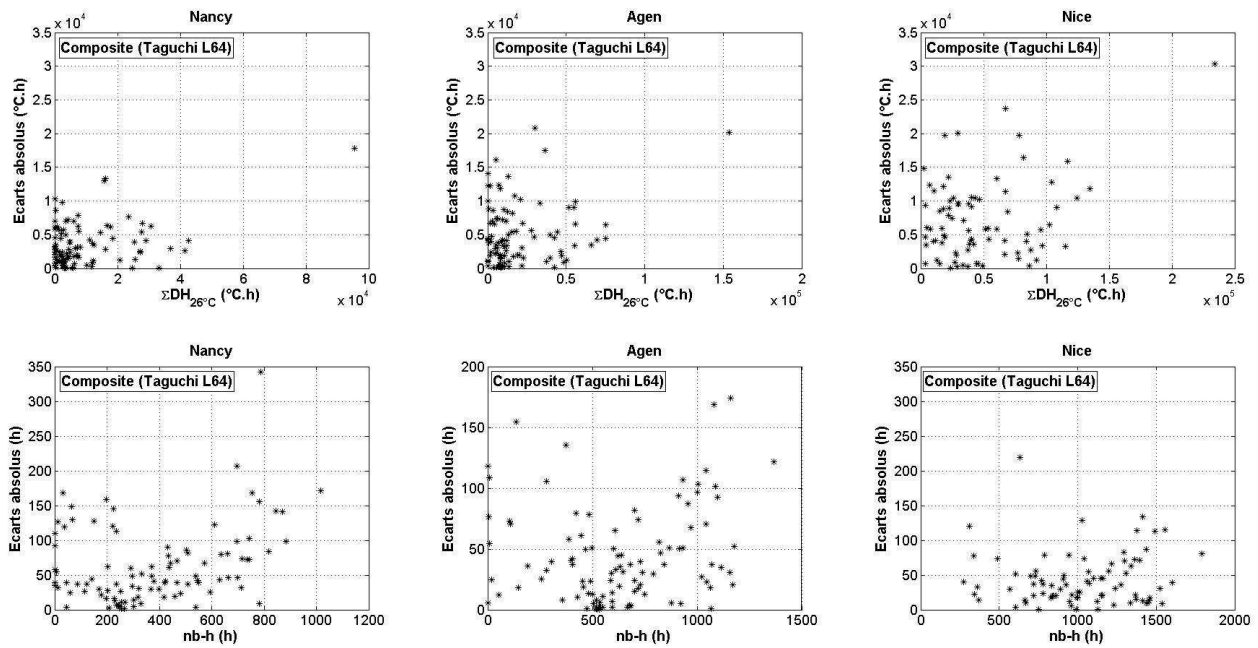


Figure 4.23 : Écarts absolus de la consommation d'énergie finale annuelle pour le plan composite $L_{64}(2^{63})$ pour les climats étudiés

Les écarts absolus obtenus pour les deux réponses ΣDH et nb-h avec les différents plans d'expériences sont très importants. Ce niveau de précision ne nous semble pas acceptable. Nous avons donc eu recours à la méthodologie développée précédemment pour améliorer la précision des modèles polynômiaux, à savoir :

- Le couplage de plusieurs plans d'expériences : Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63}) + L_{32}(2^{31}) + L_{81}(3^{40})$, soit au total 377 simulations.
- L'introduction de nouveaux termes aux polynômes de type $X_i X_j X_k$ et $X_i X_j^2$.

Les Tableau 4.15 et Tableau 4.16 montrent pour les deux réponses, la moyenne M , l'écart-type σ_r , et la valeur maximale $\Delta_{\max}$ des écarts absolus pour les plans de couplage. La Figure 4.24 donne les écarts absolus pour les 81 points d'expériences.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Couplage	103	1950	1984	11186	2037	2036	10414	3367	3211	20097	°C.h

Tableau 4.15 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus du plan d'expériences de couplage pour la détermination de la réponse ΣDH_{26} pour les climats étudiés

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Couplage	103	32,6	33,4	171,9	22,6	22,2	103,0	26,7	22,1	90,3	h

Tableau 4.16 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus du plan d'expériences de couplage pour la détermination de la réponse nb-h₂₆ pour les climats étudiés

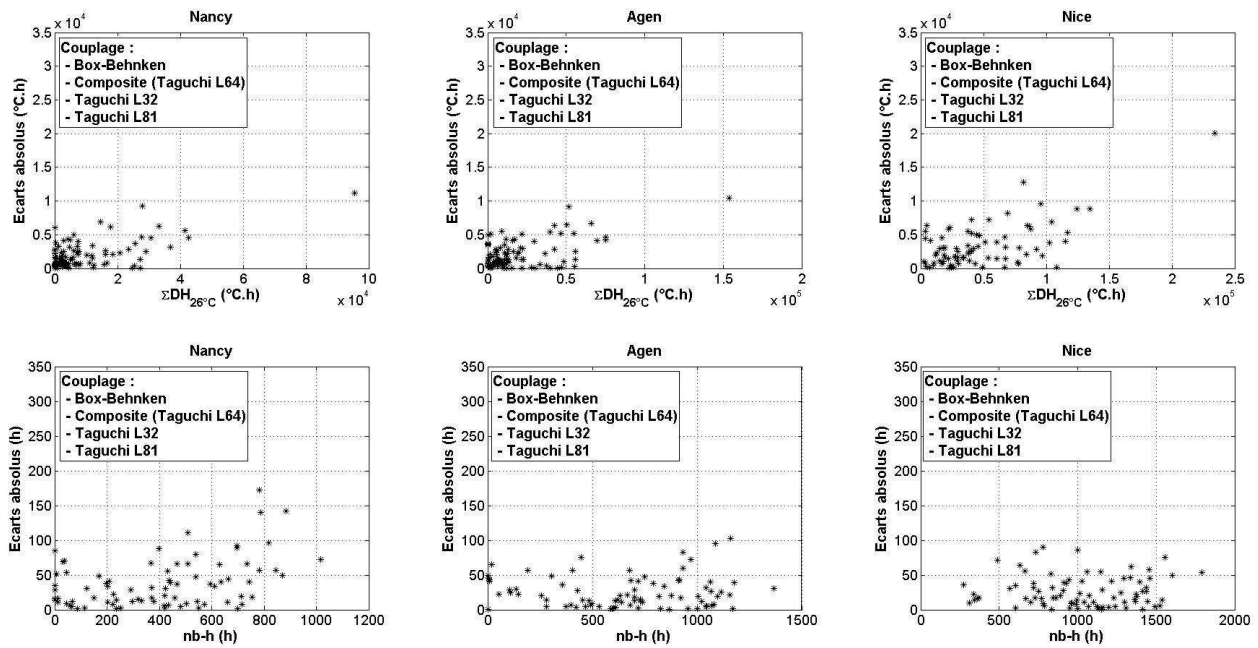


Figure 4.24 : Ecart absolu de ΣDH_{26} et nb-h₂₆ pour le plan de couplage pour les climats étudiés

Nous constatons une amélioration de la précision des modèles polynômiaux. Cependant, nous notons qu'il reste des écarts absolus non négligeables au voisinage de zéro. Ainsi, ils ne seront pas utilisés pour rechercher des solutions pour basse consommation pour le bâtiment Beethoven.

Il est très probable qu'améliorer la précision de ces modèles polynômiaux nécessiterait un investissement plus important en nombre de simulations numérique.

4.1.8 Développement des modèles polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne

Le Tableau 4.17 donne les valeurs de M , σ_r , et $\Delta_{\max}$ pour les modèles polynômiaux des plans d'expériences standards et de couplage. Les deux plans de couplage sont les mêmes que ceux utilisés pour la modélisation des besoins de rafraîchissement (voir §4.1.5).

Sur la Figure 4.25, nous avons porté les écarts absolus entre les modèles polynômiaux et la simulation numérique en fonction de la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne pour les modèles polynômiaux de plans d'expériences standards et de couplage.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Taguchi L ₃₂ (2 ³¹)	639	0,17	0,13	0,74	0,19	0,15	0,79	0,14	0,11	0,48	kWh/m ² .an
Taguchi L ₆₄ (2 ⁶³)	607	0,15	0,11	0,47	0,17	0,13	0,54	0,13	0,10	0,40	kWh/m ² .an
Taguchi L ₈₁ (3 ⁴⁰)	590	0,15	0,15	0,90	0,19	0,18	0,94	0,15	0,14	0,69	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi L ₃₂ (2 ³¹)	616	0,10	0,11	0,74	0,10	0,12	0,79	0,08	0,08	0,44	kWh/m ² .an
Composite + Taguchi L ₆₄ (2 ⁶³)	584	0,08	0,07	0,38	0,08	0,07	0,36	0,07	0,05	0,30	kWh/m ² .an
Box-Behnken	494	0,08	0,07	0,40	0,08	0,08	0,42	0,08	0,07	0,36	kWh/m ² .an
D-optimaux	590	0,12	0,09	0,46	0,13	0,11	0,57	0,09	0,07	0,40	kWh/m ² .an
Couplage 1	471	0,04	0,03	0,20	0,04	0,03	0,19	0,06	0,06	0,32	kWh/m ² .an
Couplage 2	294	0,03	0,03	0,17	0,03	0,03	0,17	0,03	0,03	0,27	kWh/m ² .an

Tableau 4.17 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences pour la détermination de la consommation d'énergie finale des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne

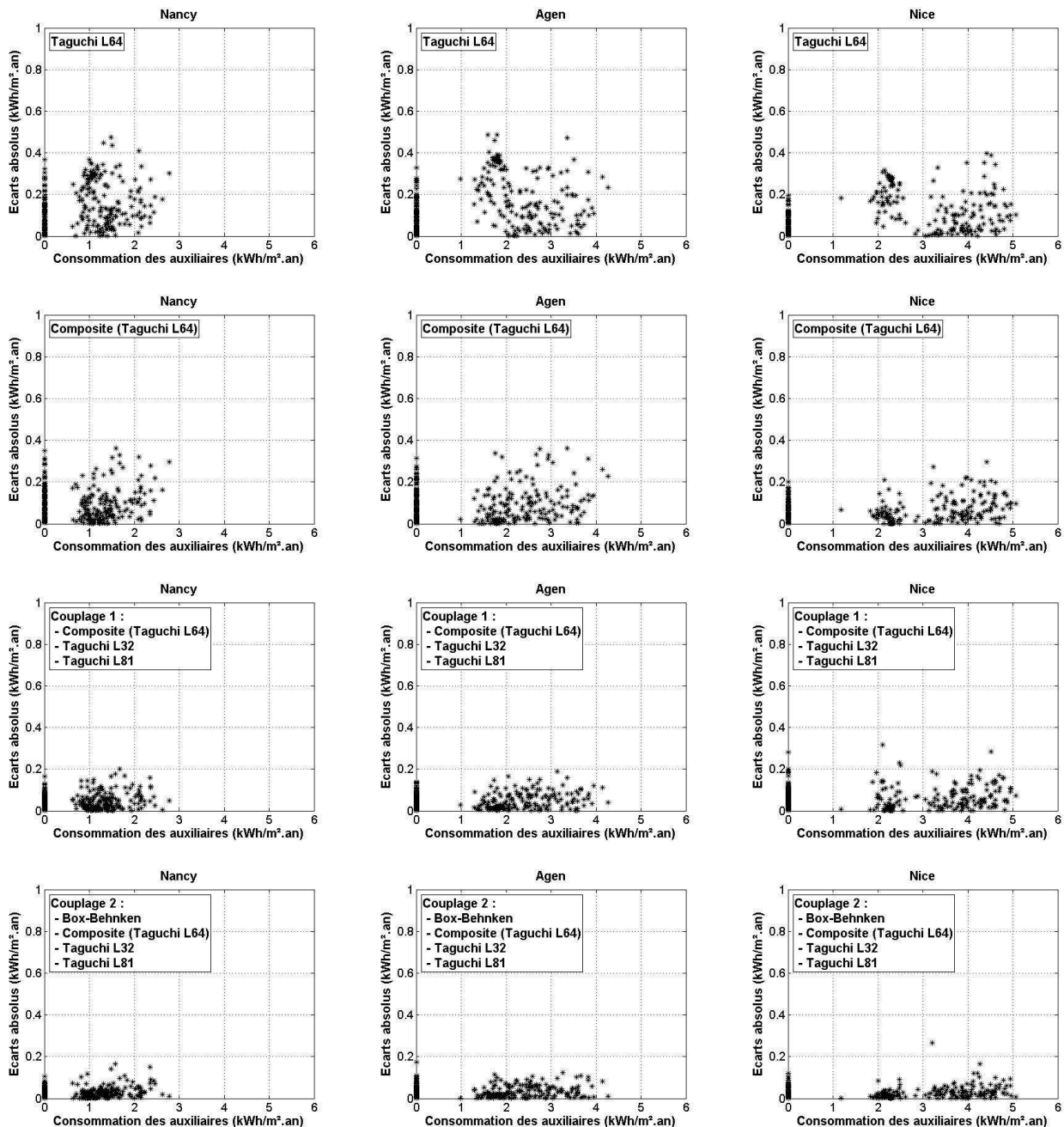


Figure 4.25 : Ecart absolu de la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne pour différents plans d'expériences

Il apparaît que les écarts obtenus avec les plans de premier degré sont non négligeables. Ces écarts sont réduits avec les plans standards du deuxième degré, D-optimaux, Box-Behnken et composite $L_{64}(2^{63})$.

La meilleure précision est obtenue avec les plans d'expériences de couplage et plus particulièrement le plan de couplage n°2. Ainsi, nous allons utiliser ce plan pour la recherche de solutions basse consommation pour le bâtiment Beethoven.

4.1.9 Synthèse et définition d'une méthodologie générale d'application de la méthode des plans d'expériences

Les différents essais de modélisation effectués à l'aide de la méthode des plans d'expériences montrent que les plans standards du premier et du deuxième degré n'offrent pas une bonne précision sur la réponse modélisée quand il s'agit d'un nombre important de facteurs dont certains sont à variation non linéaire. La seule réponse que nous sommes

parvenus à reproduire à l'aide de plans standards du deuxième degré avec une précision que nous jugeons comme acceptable, est relative aux besoins de chauffage. En effet, dans ce cas seul le facteur *Inertie* présente une variation non linéaire. De plus, ce facteur a une influence très faible sur la réponse considérée comme nous le verrons plus en avant dans cette étude.

Nous avons développé une technique permettant d'améliorer la précision des modèles polynômiaux préconisés par les plans d'expériences standards. A partir de cette technique nous allons définir une méthodologie générale d'application de la méthode des plans d'expériences dans le cadre d'une étude paramétrique de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Cette méthodologie comporte 5 étapes séquentielles, à savoir (voir Figure 4.26) :

- **Etape 1 :** Cette étape consiste à définir la ou les réponses que l'on cherche à modéliser ainsi que les facteurs étudiés. Plus le nombre de facteurs est grand et le domaine d'étude large, plus le nombre d'expériences sera important.

Il est donc essentiel de bien définir les facteurs étudiés et le domaine d'étude de façon à limiter le nombre de simulations nécessaires pour obtenir un modèle polynômial à précision acceptable. Ainsi, si on sait à l'avance qu'un facteur n'a qu'une influence marginale sur la réponse, il n'est pas nécessaire de le prendre en compte dans l'étude.

- **Etape 2 :** Cette étape consiste à sélectionner des points d'expériences repartis de manière aléatoire dans tout le domaine d'étude, y compris le centre et les extrémités. Ces points d'expériences serviront à valider le ou les polynômes recherchés.
- **Etape 3 :** Le premier modèle polynômial testé est un modèle du premier degré obtenu à partir d'un plan factoriel fractionnaire issu des tables $L_{64}(2^{63})$ et $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi par exemple. Ce modèle est ensuite comparé aux simulations numériques. Si le test est positif, c'est-à-dire si la précision est jugée par l'expérimentateur comme suffisante, l'étude est terminée. Si le test est négatif, il faut entreprendre des simulations supplémentaires pour établir un modèle du second degré.
- **Etape 4 :** Cette étape consiste à établir un modèle du second degré à partir d'un plan composite. Le plan composite est obtenu en effectuant des expériences supplémentaires à celles du plan du premier degré de l'étape 3. Ces nouvelles expériences sont des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et le centre du domaine d'étude.

Le polynôme du second degré est ensuite comparé aux simulations numériques des cas de validation de l'étape 1. Si le test est positif, l'étude est terminée. Dans le cas contraire, il faut introduire de nouveaux termes dans le modèle polynômial pour s'approcher d'avantage du modèle réel. Il faut donc définir de nouveaux plans.

- **Etape 5 :** Le nouveau plan peut être défini en couplant le plan composite avec un plan de Box-Behnken (si le nombre de facteur le permet) ou bien avec un ou plusieurs plans fractionnaires du second degré comme le plan Taguchi $L_{81}(3^{40})$. On introduit alors de nouveaux termes dans le polynôme comme par exemple des termes de la forme $X_i X_j X_k$, $X_i X_j^2$ et $X_i X_j X_k X_m$. Ensuite, on teste le polynôme obtenu avec les cas de validation définis dans l'étape 1. Si le test est positif l'étude s'achève. Dans le cas contraire il faut agrandir le plan d'expériences et introduire de nouveaux termes au polynôme, jusqu'à l'obtention d'une précision acceptable.

Pour introduire des termes du 3^{ème} et du 4^{ème} degré, il faut effectuer des simulations supplémentaires avec des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées à

égale distance entre le centre et les extrémités du domaine d'étude (niveaux -0,5 et +0,5).

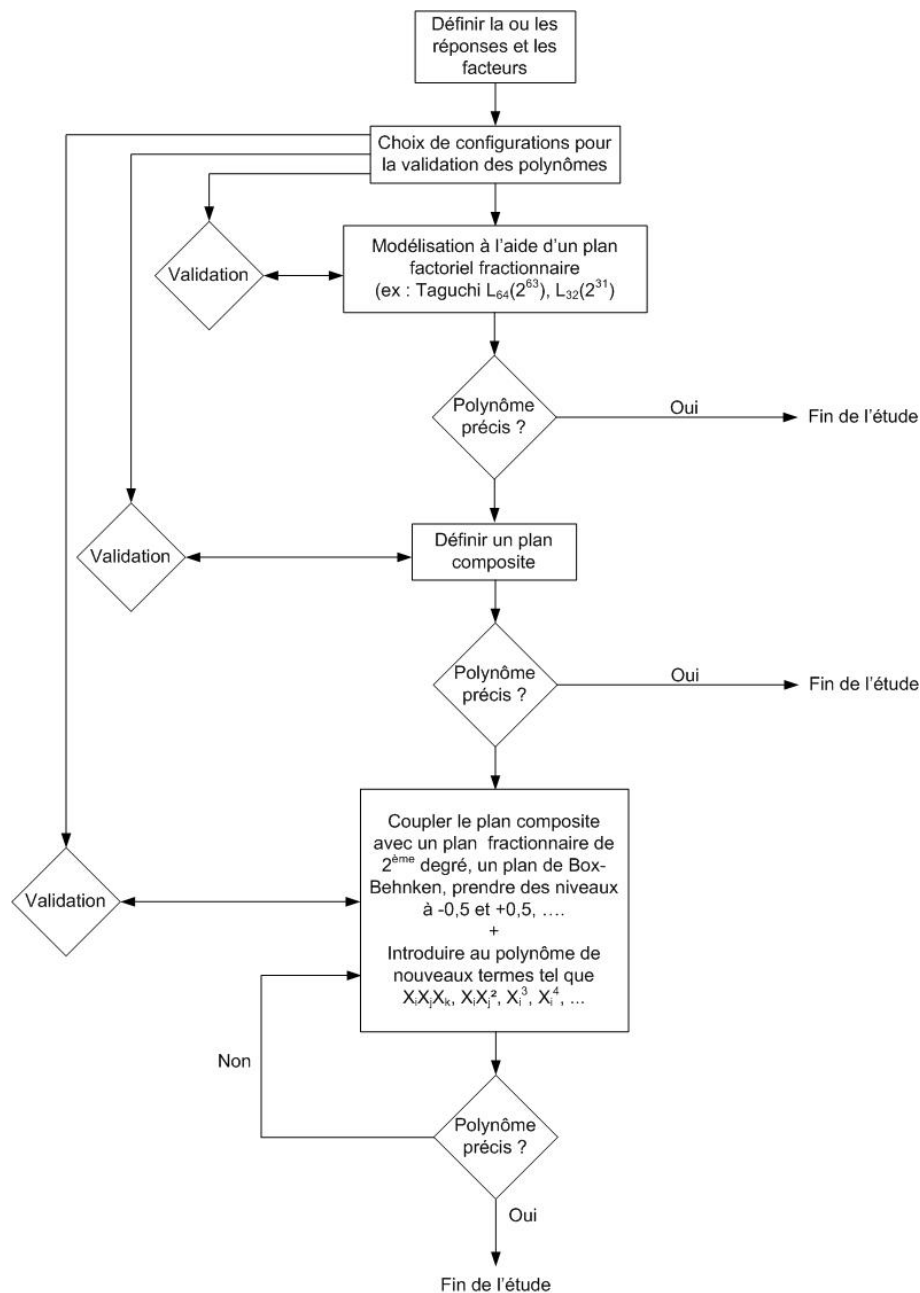


Figure 4.26 : Méthodologie d'application de la méthode des plans d'expériences pour la conception de bâtiments à basse consommation d'énergie

Cette méthodologie nous a permis d'obtenir des modèles polynômiaux d'une précision que nous jugeons acceptable pour évaluer les besoins de chauffage, les besoins de rafraîchissement, la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment et la consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne du bâtiment Beethoven.

Ces modèles seront utilisés pour identifier des solutions permettant d'améliorer les performances du bâtiment Beethoven et obtenir ainsi un bâtiment à basse consommation d'énergie.

Pour les besoins de chauffage, de rafraîchissement et la consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne, les modèles polynômiaux qui seront utilisés sont ceux du plan couplé n°2. Ce plan nécessite 373 simulations

numériques pour les besoins de chauffage et 377 pour les deux autres réponses. Il consiste à coupler les plans suivants : un plan de Box-Behnken, un composite $L_{64}(2^{63})$, un plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$ et un plan de Taguchi $L_{81}(3^{40})$.

Pour la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment, les modèles polynômiaux qui seront utilisés, sont ceux du plan de couplage comprenant : un plan composite $L_{64}(2^{63})$, un plan $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi, et deux plans $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi. Soit au total 285 simulations

Dans le Tableau 4.18, nous rappelons les indicateurs de précision de ces modèles. Il est à noter, que lors de la recherche de solution basse consommation au chapitre 5, les résultats des modèles ont été comparés à la simulation numérique, la précision constatée était satisfaisante.

Plan d'expériences	n	Nancy			Agen			Nice			Unité
		M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	M	σ_r	$\Delta_{\max}$	
Besoins de chauffage	290	0,19	0,16	0,91	0,23	0,18	0,88	0,20	0,18	0,92	kWh/m².an
Besoins de rafraîchissement	294	0,29	0,27	2,00	0,30	0,28	1,82	0,39	0,34	2,02	kWh/m².an
Consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment	394	0,95	0,92	6,05	0,99	0,95	7,80	1,20	1,11	7,03	kWh/m².an
Consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la surventilation nocturne	294	0,03	0,03	0,17	0,03	0,03	0,17	0,03	0,03	0,27	kWh/m².an

Tableau 4.18 : Evaluation de la précision des modèles polynômiaux issus des plans d'expériences de couplage

4.2 Analyse de sensibilité à l'aide des modèles polynômiaux développés

4.2.1 Introduction

L'une des applications des modèles polynômiaux déterminés précédemment est l'évaluation des effets des facteurs et de leurs interactions vis à vis des réponses modélisées. Il s'agit d'une analyse de sensibilité connue également sous le nom de « screening » dont l'objectif est de mettre en évidence les facteurs les plus influents sur la réponse considérée et les interactions les plus significatives.

Dans cette partie, nous allons analyser les effets et les interactions des facteurs par rapport aux cinq réponses définies précédemment. De plus, nous allons comparer la précision des plans d'expériences standards et de couplage pour des études de sensibilité, afin de mettre en évidence les plans d'expériences adéquats pour mener à bien de telles études.

L'influence de chaque facteur sur une réponse donnée peut être évaluée en calculant son effet moyen défini comme étant la différence moyenne entre la valeur de la réponse lorsque le facteur est au niveau (+1) et la valeur de la réponse lorsque le facteur est au niveau (-1), les autres facteurs étant fixés au niveau zéro.

Considérons à titre d'exemple le modèle polynômial suivant :

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = a_0 + \sum_i^n a_i X_i + \sum_{i,j}^{\frac{n-1}{2}} a_{ij} X_i X_j + \sum_i^n a_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j} a_{ijj} X_i X_j^2 + \sum_i^n a_{iii} X_i^3 \quad (4.5)$$

Rappelons qu'en unité réelle, les facteurs sont désignés par x_i , et qu'en variable centrée réduite, les facteurs sont désignés par X_i .

L'effet moyen du facteur x_i s'écrit :

$$\text{Effet}(x_i) = \frac{f(0,0,\dots,1,\dots,0) - f(0,0,\dots,-1,\dots,0)}{2} = a_i + a_{iii} \quad (4.6)$$

L'équation (4.6) montre que l'analyse des effets des facteurs nécessite une bonne précision sur les coefficients des modèles polynômiaux.

En faisant l'identification avec les termes du développement en série de Taylor (voir chapitre 3, §3.2.5), nous pouvons écrire :

$$\text{Effet}(x_i) = a_i + a_{iii} = \left(\frac{\Delta_i}{2} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{(b_1, \dots, b_n)} + \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta_i}{2} \right)^3 \cdot \left(\frac{\partial^3 f}{\partial x_i^3} \right)_{(b_1, \dots, b_n)} \quad (4.7)$$

L'équation (4.7) montre que l'effet d'un facteur x_i dépend de la dimension de son intervalle de variation Δ_i multiplié par la dérivée du premier et du troisième ordre de la fonction f par rapport au facteur x_i au centre du domaine d'étude.

L'équation (4.7) est d'une grande importance. Elle permet en effet de prédire la variation des effets en fonction du contexte climatique. Considérons à titre d'exemple les besoins de chauffage. Ces besoins peuvent être calculés de manière simplifiée en écrivant le bilan énergétique annuel du bâtiment :

$$\begin{aligned} E_{ch} &= \text{Déperditions} - \text{gains} \\ &= \left(m_{vent} C_p DH \right) + \left(m_{inf} C_p DH \right) + (DH \sum S_{parois}) U_{parois} + (DH \sum S_w) U_w + (DH) \sum \psi L \\ &\quad - \text{gains internes} - \text{gains solaires} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Considérons le facteur U_w . Son effet est calculé par la dérivée de l'équation (4.8) par rapport à U_w :

$$\text{Effet}(U_w) = \frac{\Delta_{U_w}}{2} \cdot DH \sum S_{w,0} \quad (4.9)$$

L'équation (4.9) montre que l'effet du facteur U_w est directement proportionnel à la dimension de son intervalle de variation Δ_{U_w} , aux conditions climatiques quantifiées par le nombre de degrés-heures de chauffage DH et à la valeur de la surface des parois vitrées au centre du domaine d'étude.

En effectuant le même calcul pour les autres facteurs et pour les autres réponses, on peut constater que les effets de tous les facteurs sont proportionnels à la dimension de leurs intervalles de variation et aux conditions climatiques, comme par exemple le nombre de degrés-heures de chauffage (ou de rafraîchissement) pour les facteurs concernant les flux conductifs et la ventilation mécanique, le flux solaire pour les facteurs relatifs à la transmission solaire tel que le facteur solaire.

L'effet d'un facteur sur la réponse peut dépendre des niveaux des autres facteurs, c'est la raison pour laquelle nous appelons les effets calculés à l'aide de l'équation (4.6) « Effets moyens » parce qu'ils sont évalués en fixant les autres facteurs au niveau (0). Calculons à titre d'exemple, l'effet du facteur x_i , lorsque tous les facteurs sont au niveau (0), à l'exception du facteur x_1 qui reste au niveau (+1). Cet effet est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Effet}(x_i) = \frac{f(1,0,\dots,1,\dots,0) - f(1,0,\dots,-1,\dots,0)}{2} = a_i + a_{iii} + (a_{i1} + a_{i11}) \quad (4.10)$$

L'effet obtenu est donc différent de celui calculé lorsque tous les facteurs y compris le facteur x_1 , sont au niveau (0). On parle donc d'une interaction entre les facteurs x_i et x_1 . Cette interaction est d'autant plus forte que les termes a_{i1} et a_{i11} sont importants. Le terme a_{i1}

représente l'interaction d'ordre 2 entre les facteurs x_i et x_j , notée souvent $x_i.x_j$. Le terme a_{i11} est une interaction d'ordre 3, notée $x_i.x_j^2$.

Illustrons à titre d'exemple l'interaction entre les facteurs U_w et %vitrage par rapport aux besoins de chauffage. La Figure 4.27 montre les besoins de chauffage en fonction des facteurs U_w et %vitrage. On peut constater que la variation des besoins de chauffage lorsque le facteur %vitrage passe du niveau bas au niveau haut, n'est pas la même selon le niveau du facteur U_w . On parle donc d'une interaction entre les deux facteurs.

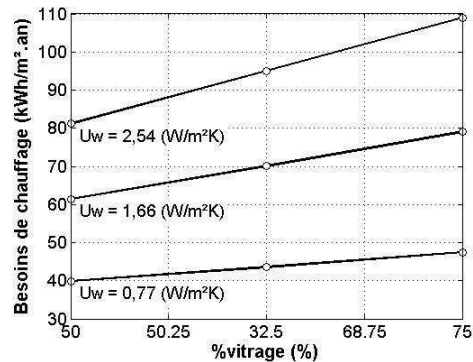


Figure 4.27 : Interactions entre les facteurs U_w et %vitrage par rapport aux besoins de chauffage

4.2.2 Analyse de sensibilité pour les besoins de chauffage

Dans le but d'évaluer la précision des modèles polynômiaux pour une étude de sensibilité, nous avons déterminé les effets moyens des facteurs sur les besoins de chauffage pour deux plans standards du premier degré, un plan standard du deuxième degré et un plan de couplage, à savoir : les plans de Taguchi $L_{32}(2^{31})$ et $L_{64}(2^{63})$, plan de Box-Behnken et le plan couplé numéro 2 (voir §4.1.4). Les effets obtenus sont comparés à la simulation numérique (voir Figure 4.28). L'effet moyen d'un facteur est calculé par la simulation numérique à l'aide de l'équation (4.6), en déterminant la valeur réponse lorsque ce facteur est respectivement au niveau (+1) et au niveau (-1), les autres facteurs étant au niveau (0). Les expressions de ces modèles polynômiaux sont présentées dans l'annexe A9.

Les effets de signe positif indiquent une augmentation de la réponse besoins de chauffage quand le facteur passe du niveau (-1) à (+1) et inversement. A titre d'exemple, si on augmente la puissance installée de l'éclairage artificiel (effet négatif) ou si on réduit le pourcentage de vitrage (effet positif), les besoins de chauffage diminuent.

On remarque que les effets obtenus par les différents plans d'expériences sont très proches. Le niveau de précision de ces différents plans est donc suffisant pour mener à bien des études de sensibilité pour les besoins de chauffage.

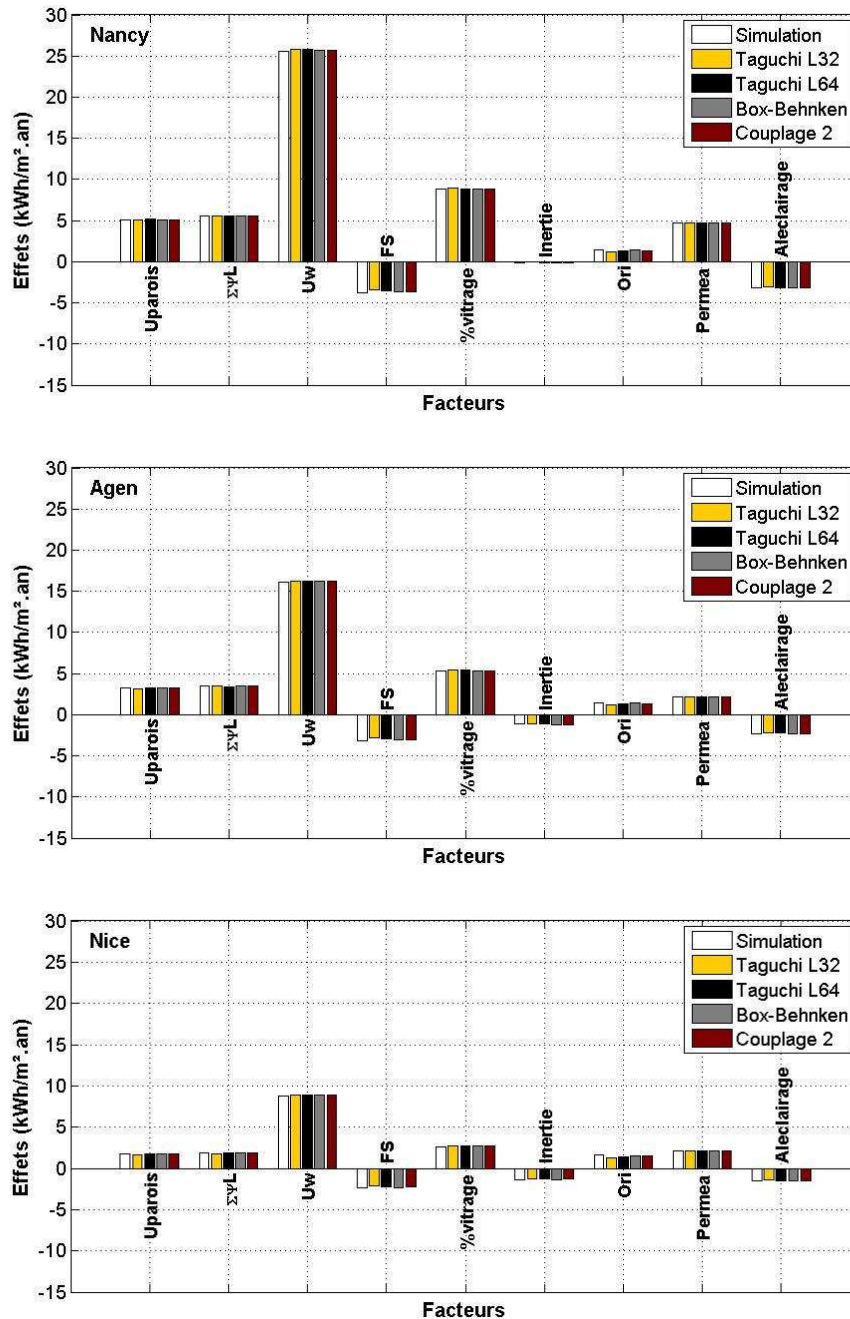


Figure 4.28 : Effets des facteurs sur les besoins de chauffage pour Nancy, Agen et Nice

De plus, les résultats obtenus appellent les commentaires suivants :

- Les facteurs qui ont le plus d'impact sur les besoins de chauffage concernent l'isolation thermique de l'enveloppe, la perméabilité à l'air et les apports solaires, à savoir *Uparois*, $\Sigma\psi L$, U_w , %vitrage, *Permea* et *FS*. Ce résultat était attendu. L'orientation et l'inertie thermique du bâtiment, *Ori* et *Inertie*, agissent également sur les besoins de chauffage mais dans une moindre mesure.
- Le facteur de transmission des parois vitrées U_w possède l'effet le plus important sur les besoins de chauffage pour les trois climats. Cet effet diminue en passant de Nancy à Agen puis à Nice. Ce phénomène est directement lié à la diminution du nombre de degrés-heures de chauffage en passant d'un climat à un autre.
- Le facteur $\Sigma\psi L$ possède un effet plus important que le facteur *Uparois*. Ceci est dû au domaine de variation du facteur $\Sigma\psi L$ qui est plus large que celui du facteur *Uparois* mais

ne signifie pas que les ponts thermiques sont plus importants que l'isolation thermique des parois opaques en terme d'impact sur les besoins de chauffage.

- L'inertie thermique a un effet négatif et très limité sur les besoins de chauffage. Elle permet en effet de stocker de l'énergie solaire et des gains internes pendant la journée en période d'occupation, cette énergie stockée permet de réduire les besoins de chauffage en période d'inoccupation lorsqu'elle est restituée à l'intérieur du bâtiment.

La Figure 4.29 montre les principales interactions entre les facteurs, dont la plus significative est celle entre les facteurs Uw et $\%vitrage$ ($Uw.\%vitrage$). Les interactions ne peuvent pas être comparées à la simulation numérique, toutefois, plus le modèle polynômial est précis, plus la précision sur les interactions est meilleure. Nous comparons donc les interactions obtenues par le plan de couplage qui présente le meilleur niveau de précision parmi les différents plans que nous avons étudiés.

Les modèles polynomiaux comprennent, bien entendu, un grand nombre d'interactions que nous avons décidé de ne pas montrer afin de simplifier la présentation des résultats. Nous rappelons que les expressions complètes des modèles polynomiaux sont présentées dans l'Annexe A9.

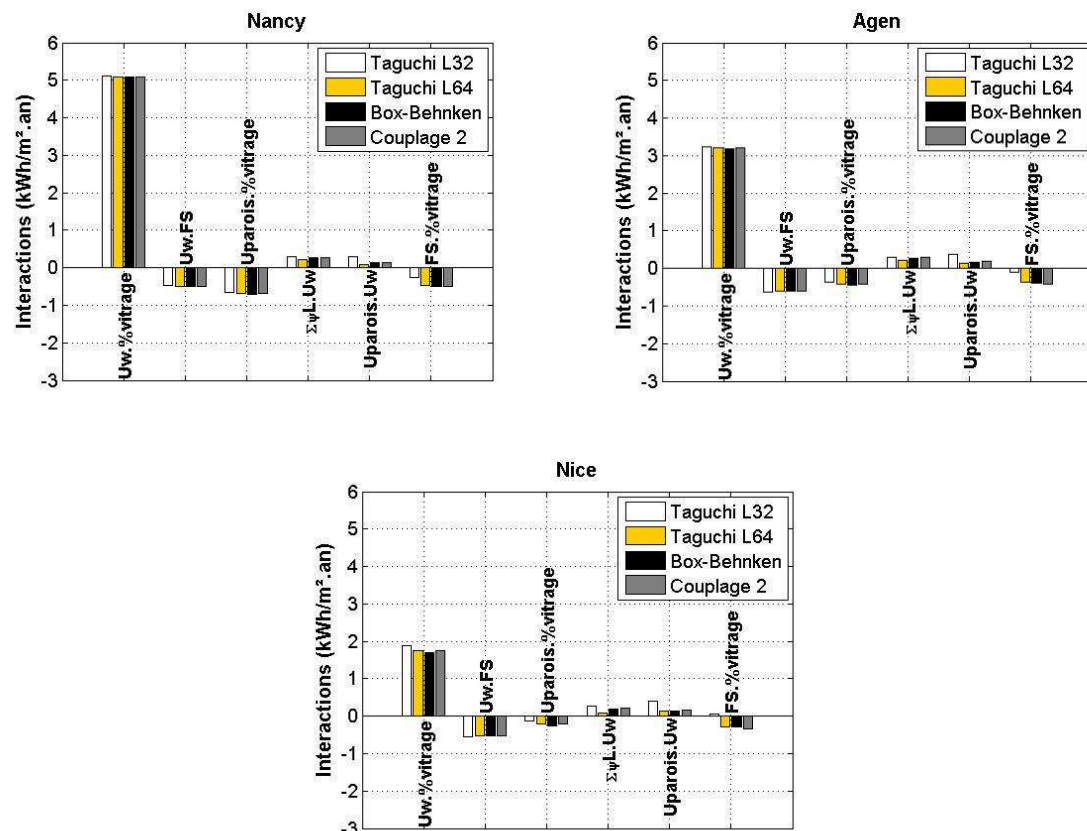


Figure 4.29 : Interactions entre facteurs pour les besoins de chauffage pour Nancy, Agen et Nice

On peut constater que les interactions déterminées avec les différents plans sont globalement très proches.

D'une manière générale, les résultats montrent que pour une étude de sensibilité concernant les besoins de chauffage, la précision obtenue par les modèles polynômiaux des différents plans d'expériences est satisfaisante.

4.2.3 Analyse de sensibilité pour les besoins de rafraîchissement

La Figure 4.30 montre les effets moyens des facteurs sur les besoins de rafraîchissement pour Nancy, Agen et Nice. Les expressions de ces modèles polynômiaux sont présentées dans l'annexe A10.

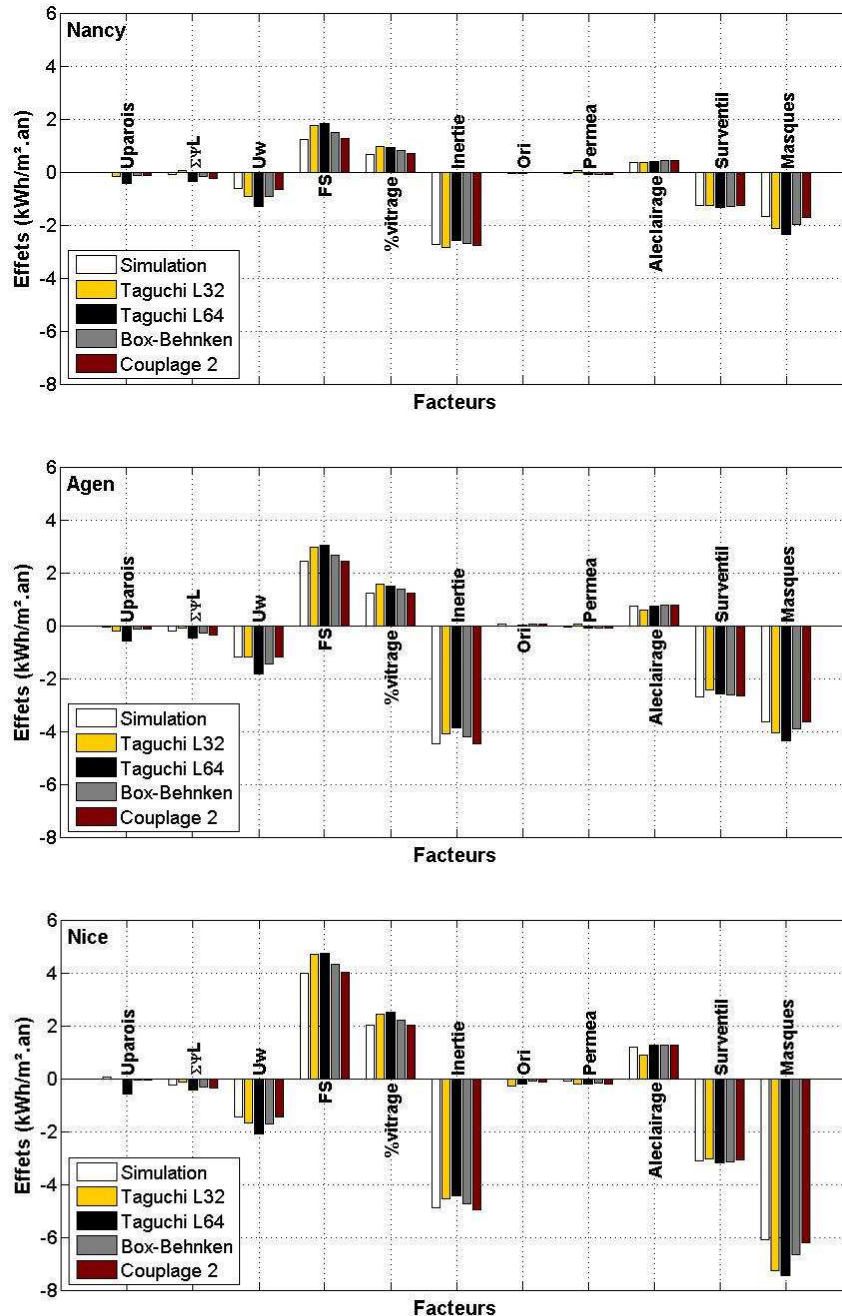


Figure 4.30 : Effets des facteurs sur les besoins de rafraîchissement pour Nancy, Agen et Nice

Les besoins de rafraîchissement sont principalement provoqués par les gains internes et les apports solaires. L'augmentation de l'inertie thermique de l'enveloppe et le recours à une surventilation nocturne permet de réduire ces besoins. Ceci est visible en observant les effets de ces facteurs. En effet, les facteurs les plus influents sont l'inertie thermique *Inertie*, la surventilation mécanique nocturne *Surventil* et les facteurs relatifs aux apports solaires tels que les masques *Masques*, le facteur solaire *FS* et le pourcentage de vitrage *%vitrage*.

De plus, on constate que les facteurs qui concernent l'isolation thermique de l'enveloppe *Upa*, $\sum \psi L$, U_w et le facteur *Permea* ont des effets négatifs sur les besoins de rafraîchissement. Ceci signifie que si on augmente l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe les besoins de rafraîchissement augmenteront. En effet, la réduction de l'isolation thermique et de l'étanchéité à l'air favorise les pertes par conduction et par convection durant la nuit et réduit ainsi les besoins de rafraîchissement.

Le modèles polynômiaux du plan de couplage n°2 (voir §4.1.5) donne les effets les plus proches de la simulation numérique. Ceci est logique vu que c'est le plan le plus précis que nous avons défini pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement. Les effets obtenus par les modèles polynômiaux des plans d'expériences standards du premier et du second degré sont plus éloignés de la simulation numérique. Les effets sont souvent surestimés, mais l'ordre de grandeur reste proche.

La Figure 4.31 montre des exemples d'interactions significatives d'ordre deux entre les facteurs.

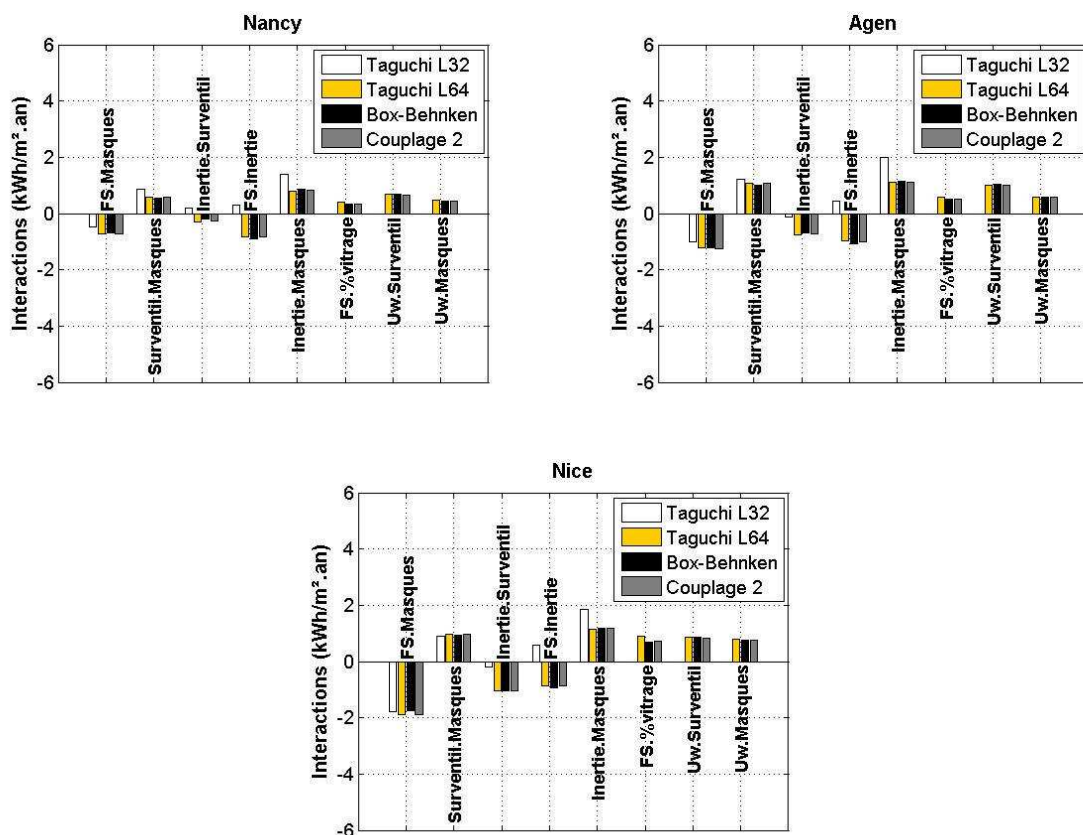


Figure 4.31 : Interactions entre facteurs pour les besoins de rafraîchissement pour Nancy, Agen et Nice

On remarque que les interactions obtenues par les plans Taguchi $L_{64}(2^{63})$, Box-Behnken et couplage 2 sont très proches. Ces interactions sont très différentes de celles obtenues avec le plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$. Il existe même des interactions supposées nulles pour ce plan et qui sont importantes pour les autres plans. En effet, le plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$ ne permet de prendre en compte qu'un nombre limité d'interactions. Dans le cas où les interactions non prise en compte sont non négligeables, comme c'est le cas des interactions *FS.%vitrage*, *Uw.Surventil* et *Uw.Masques*, ces interactions sont aliassées avec d'autres interactions du modèle et vont fausser les résultats.

Globalement, nous pouvons conclure que pour une étude de sensibilité concernant les besoins de rafraîchissement, nous conseillons d'utiliser des plans de couplage si l'on souhaite avoir une bonne précision sur les ordres de grandeur des effets des facteurs et des

interactions. Les plans du premier et du second degré standards permettent de mettre en évidence les facteurs les plus influents, mais présentent un risque de mal estimer les valeurs de ces effets. Les interactions obtenues par ces plans sont proches de celle du plan de couplage à part la table $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi qui n'est pas adaptée pour étudier un grand nombre de facteurs.

4.2.4 Analyse de sensibilité pour la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment

La Figure 4.32 montre les effets moyens des facteurs sur la consommation d'énergie finale pour les trois climats étudiés.

Nous considérons toujours deux plans d'expériences standards du premier degré, un plan d'expériences standard du deuxième degré et un plan d'expériences de couplage (voir §4.1.6). Les expressions des modèles polynômiaux sont présentées dans l'annexe A11.

Le coefficient de performance global de l'installation de chauffage *COP* est le facteur qui a le plus grand effet sur la consommation d'énergie finale pour les trois climats. L'éclairage artificiel et le coefficient de transmission des parois vitrées présentent également des effets importants. L'efficacité globale du système de rafraîchissement *EER* a un effet négligeable à Nancy, limité à Agen et significatif à Nice. Les autres facteurs ont des effets plus faibles voire marginaux pour certains climats.

Malgré un effet négatif sur les besoins de rafraîchissement, la surventilation mécanique nocturne a un effet positif sur la consommation d'énergie finale annuelle pour les trois climats. En effet, elle réduit les besoins de rafraîchissement mais augmente en même temps la consommation des auxiliaires de la ventilation mécanique. Une surventilation nocturne naturelle voire hybride réduirait ces consommations d'énergie.

Logiquement, le modèle polynômial du plan d'expériences de couplage donne les effets les plus proches de la simulation numérique. Les autres modèles polynômiaux sont moins précis en surestimant les effets de certains facteurs, mais l'ordre de grandeur des facteurs reste le même que celui de la simulation numérique.

La Figure 4.33 montre des exemples d'interactions d'ordre deux entre les facteurs. On constate que ces interactions sont significatives. A l'instar des besoins de rafraîchissement, les interactions obtenues par les plans Taguchi $L_{64}(2^{63})$, Box-Behnken et couplage sont très proches. Ces interactions n'ont pas été prises en compte par le plan Taguchi $L_{32}(2^{31})$, elles sont donc alias avec d'autres interactions et vont donc perturber les résultats des modèles polynômiaux déterminés à partir de cette table.

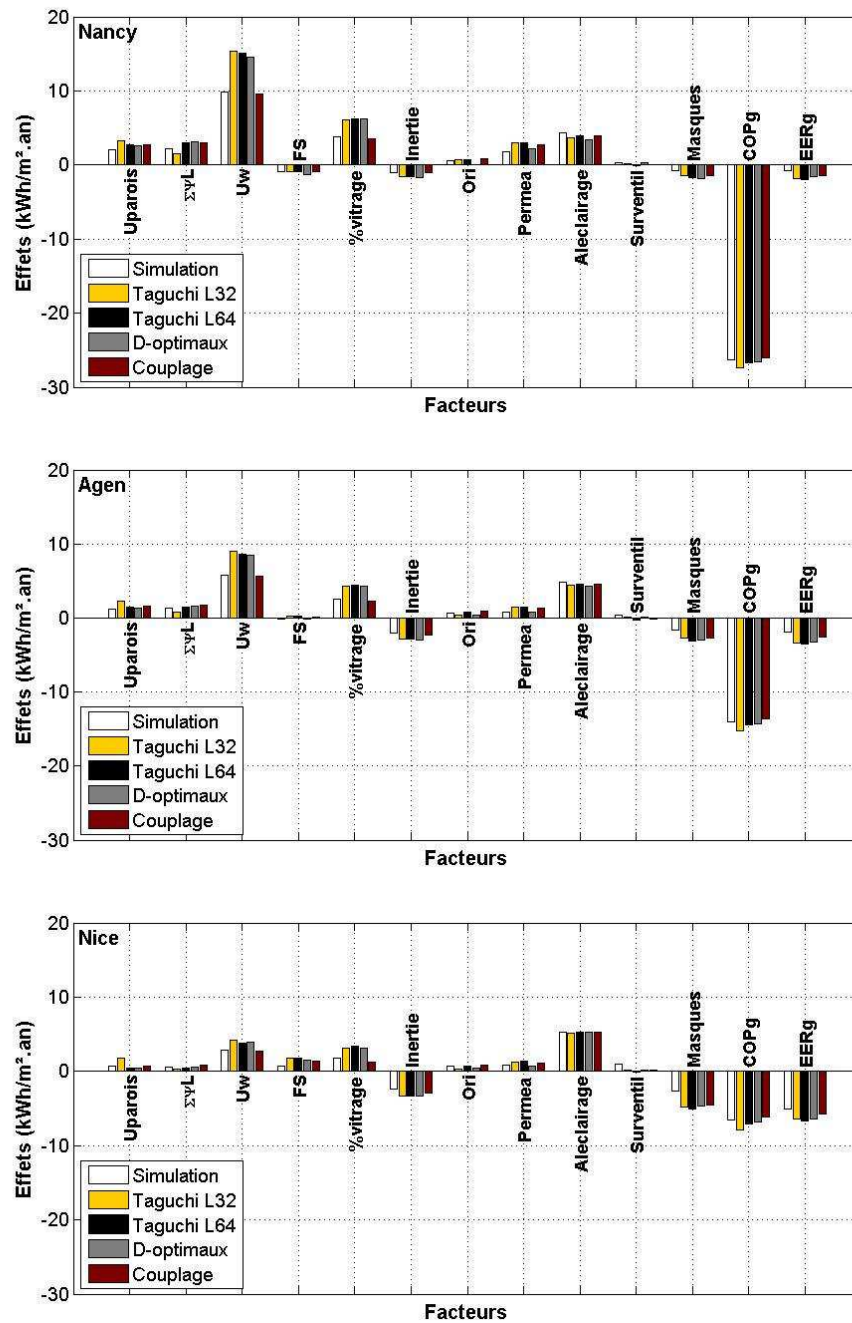


Figure 4.32 : Effets des facteurs sur la consommation d'énergie finale annuelle pour Nancy, Agen et Nice

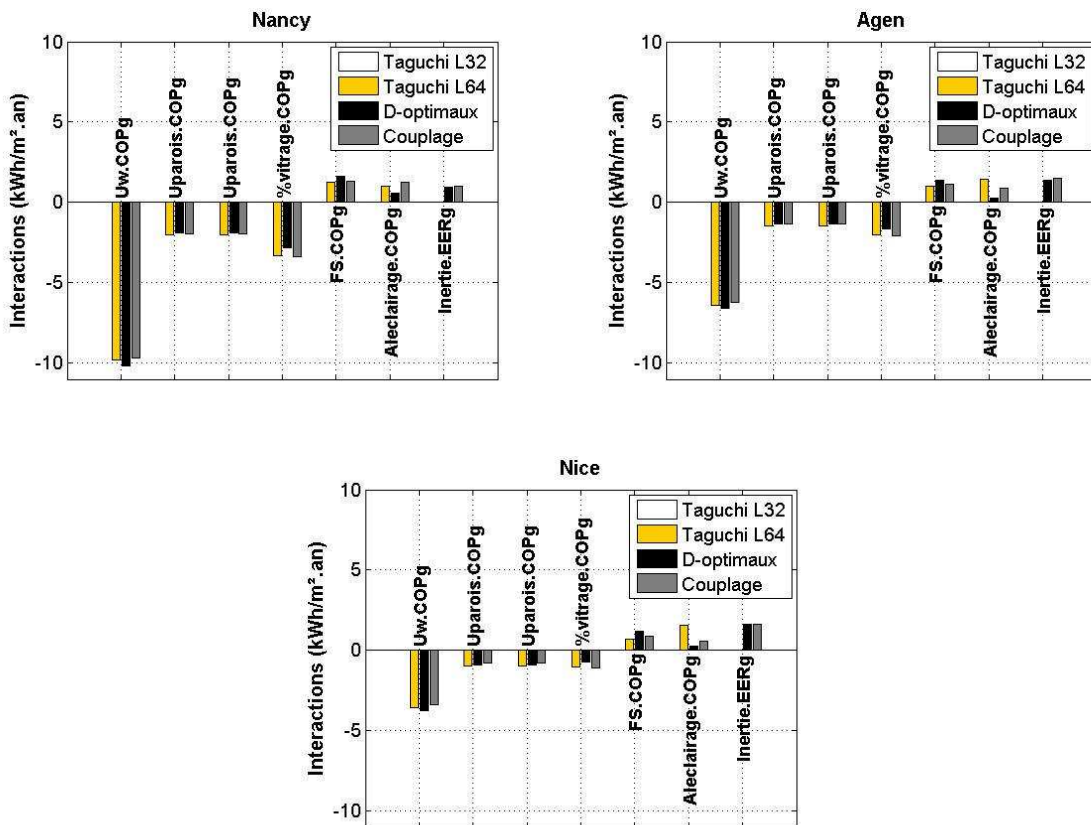


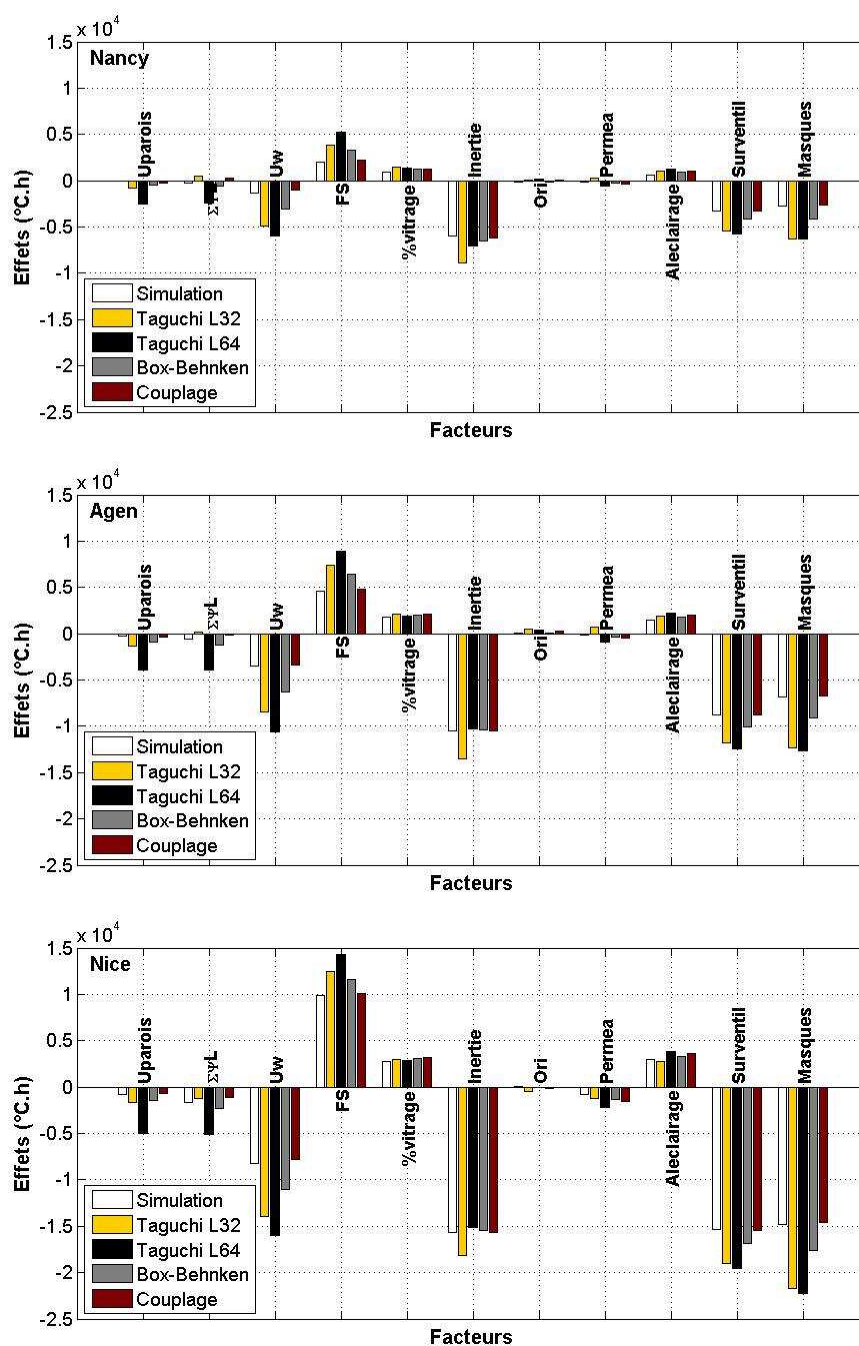
Figure 4.33 : Interactions entre facteurs pour la consommation d'énergie finale annuelle pour Nancy, Agen et Nice

4.2.5 Analyse de sensibilité pour le confort thermique d'été

Nous présentons uniquement pour le confort thermique d'été les effets des facteurs (voir Figure 4.34 et Figure 4.35). Les modèles polynômiaux pour l'évaluation du confort thermique d'été comprennent un grand nombre d'interactions qu'il est possible d'apprécier en se référant à l'Annexe A12.

D'une manière logique, les remarques formulées pour les besoins de rafraîchissement concernant les facteurs les plus influents sont valables pour le confort thermique d'été.

Le plan de couplage que nous avons défini (voir §4.1.7) donne une bonne appréciation des effets des facteurs. La précision des modèles polynômiaux des plans standards, et plus particulièrement les plans du premier degré, n'est pas assez satisfaisante. Les effets des facteurs sont surestimés pour la réponse ΣDH et sous estimé pour la réponse nb-h. De plus, l'ordre d'importance des facteurs peut être différent de celui obtenu par la simulation numérique. Leur utilisation pour de telles études de sensibilité est donc risquée, voire déconseillée.


 Figure 4.34 : Effets des facteurs sur le confort thermique d'été ($\Sigma DH_{26^\circ C}$) pour Nancy, Agen et Nice

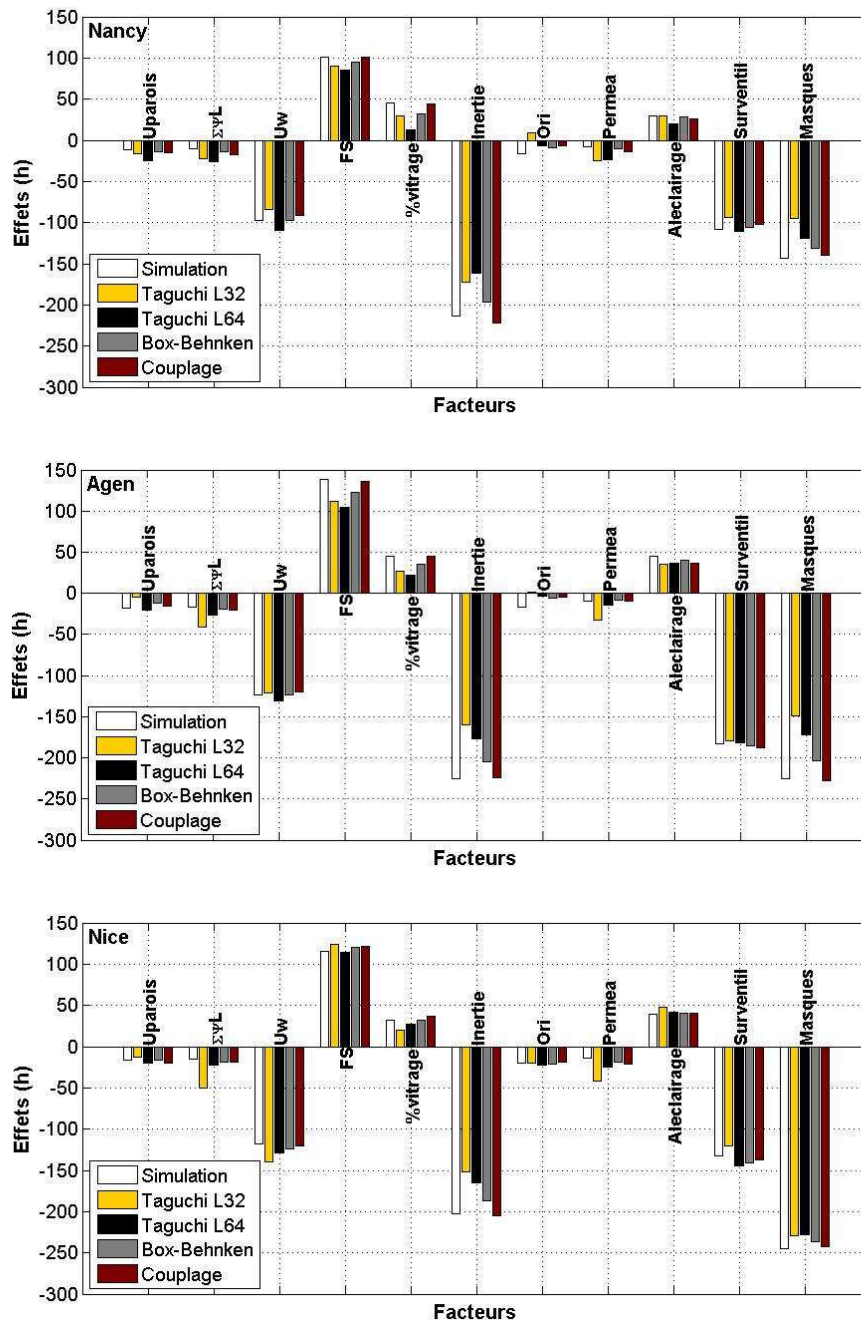


Figure 4.35 : Effets des facteurs sur le confort thermique d'été (nb-h₂₆°C) pour Nancy, Agen et Nice

4.2.6 Analyse de sensibilité pour la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne

Les expressions des modèles polynômiaux sont données dans l'annexe A13. La précision obtenue sur le calcul des effets moyens et les principales interactions est appréciable (voir Figure 4.36 et Figure 4.37).

Il apparaît alors que pour une étude de sensibilité concernant la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne, il est possible d'utiliser les modèles polynômiaux des différents plans d'expériences.

Logiquement, le facteur qui a l'effet le plus important est *Surventil*. Les facteurs *Uw*, *FS*, *Inertie* et *Masques* ont des effets beaucoup moins importants, le reste des facteurs ont des effets négligeables.

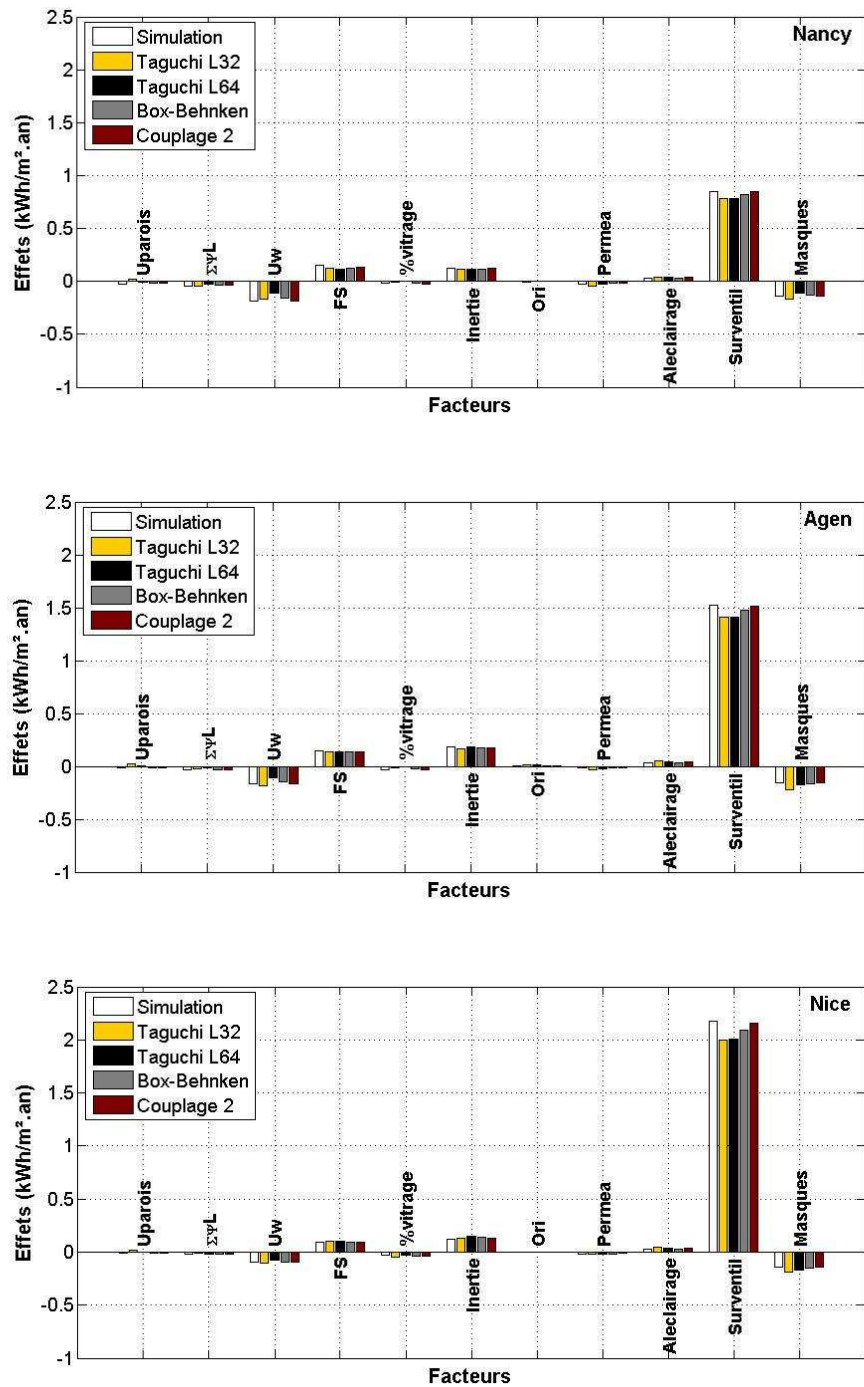


Figure 4.36 : Effets des facteurs sur la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne pour Nancy, Agen et Nice

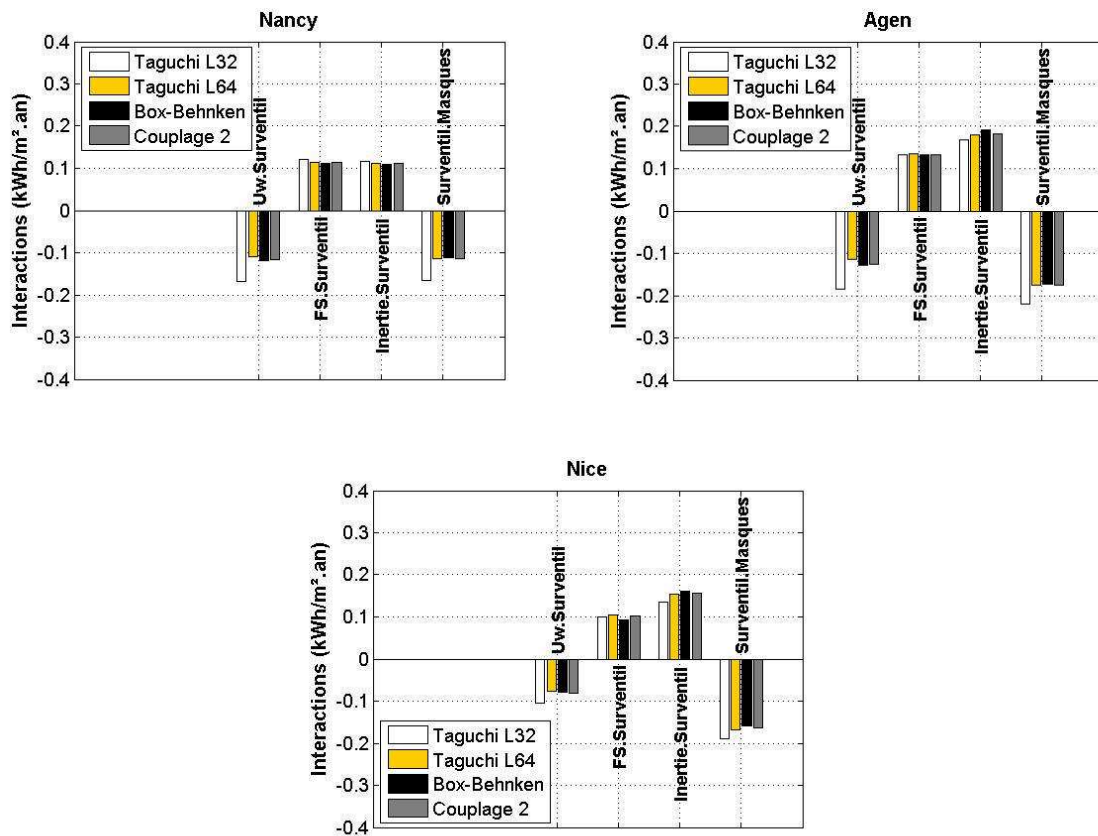


Figure 4.37 : Interactions entre facteurs pour la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne pour Nancy, Agen et Nice

4.2.7 Synthèse et analyses

Les modèles polynômiaux que nous avons déterminés à l'aide de couplage de plans d'expériences présentent une bonne précision pour mener à bien des études de sensibilité concernant les différentes réponses que nous avons définies.

En revanche, les résultats obtenus avec les plans d'expériences standards sont moins satisfaisants. Ainsi, à l'exception des besoins de chauffage et la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne, les effets sur les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie finale, ont tendances à être surestimés. Il est donc possible de les utiliser pour identifier les facteurs les plus influents sans exiger une bonne précision sur les ordres de grandeurs.

Enfin, la précision obtenue avec les modèles polynômiaux des plans standards pour l'étude de sensibilité concernant le confort thermique d'été n'est pas concluante. Les effets de certains facteurs sont mal estimés et l'ordre d'importance des facteurs est parfois différent de celui obtenu par la simulation numérique. Leur utilisation pour de telles études de sensibilité est donc déconseillée.

4.3 Analyse de solutions performantes à l'aide des modèles polynômiaux développés

4.3.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons nous servir des modèles polynômiaux développés précédemment pour analyser des solutions performantes permettant de concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie. Le cas d'étude est le bâtiment Beethoven défini dans le chapitre 3.

Il nous semble intéressant de prendre en compte dans l'analyse de solutions performantes, la possibilité de réduction des besoins de chauffage via l'utilisation de systèmes de préchauffage de l'air neuf comme les échangeurs géothermiques et les systèmes de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. Il existe en effet une interaction forte entre ce type de système et le niveau d'isolation thermique de l'enveloppe. Plus l'isolation du bâtiment est forte, plus les déperditions par ventilation deviennent importantes et rendent obligatoire la limitation de ces pertes via de tels systèmes.

Nous avons donc déterminé de nouveaux modèles polynômiaux pour les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale, en prenant en compte la présence d'un système de ventilation double flux avec préchauffage de l'air neuf par récupération de chaleur sur l'air extrait. Ce système va réduire les déperditions par ventilation et ainsi les besoins de chauffage mais accroître la consommation d'électricité liée aux auxiliaires de ventilation. Nous n'avons pas considéré un échangeur géothermique pour le préchauffage de l'air neuf. En effet, son potentiel pour le préchauffage est marginal lorsqu'il est couplé à un système double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait (Chlela et al, 2007). Par contre, son effet pour la réduction des besoins de rafraîchissement sera étudié ultérieurement dans le chapitre 5.

Ces nouveaux modèles polynômiaux n'ont pas nécessité de simulations numériques supplémentaires. En effet, en calculant les besoins de chauffage, nous avons évalué simultanément l'énergie totale liée aux déperditions d'énergie par ventilation en période hivernale. Ces déperditions ont permis de déterminer les besoins de chauffage avec un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{\text{chauffage,DF}} = (E_{\text{chauffage,SF}} - E_{V,\text{SF}}) + E_{V,\text{DF}} \quad (4.11)$$

Avec,

$E_{V,\text{SF}}$	pertes par ventilation avec un système de ventilation simple flux, (kWh/m ² .an)
$E_{V,\text{DF}}$	pertes par ventilation avec un système de ventilation double flux, (kWh/m ² .an)
$E_{\text{chauffage,SF}}$	besoins de chauffage dans le cas d'un système de ventilation simple flux, (kWh/m ² .an)
$E_{\text{chauffage,DF}}$	besoins de chauffage dans le cas d'un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait, (kWh/m ² .an)

La perte d'énergie par ventilation avec un système de ventilation double flux est calculée à partir des pertes par ventilation avec un système simple flux à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{V,\text{DF}} = (1 - \varepsilon) E_{V,\text{SF}} \quad (4.12)$$

ε est l'efficacité du récupérateur de chaleur.

Afin de valider ces deux équations, nous avons réalisé des simulations numériques en couplant le bâtiment avec un système de ventilation double flux. Les besoins de chauffage obtenus sont équivalents à ceux calculés à l'aide de l'équation (4.11).

L'efficacité du récupérateur de chaleur a été fixée à 80%. Le récupérateur du système de ventilation double flux est bypassé en période estivale et n'a donc aucun impact sur les besoins de rafraîchissement et le confort thermique d'été. Nous avons dimensionné les conduits d'air de ce système et calculé ses pertes de charge afin de déterminer les puissances requises des ventilateurs de soufflage et d'extraction. Ensuite, nous avons déterminés à l'aide de la simulation numérique, leur consommation d'énergie finale annuelle que nous avons intégrée à la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment. Cette consommation s'élève à 5,4 kWh/m².an.

Les expressions des modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage et de la consommation d'énergie finale annuelle avec une ventilation double flux sont présentées dans l'annexe A14.

4.3.2 Analyse de solutions performantes pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement

La Figure 4.38 montre les besoins de chauffage et de rafraîchissement pour les trois climats étudiés, calculés dans tout le domaine d'étude à l'aide des polynômes déterminés par la méthode des plans d'expériences, chaque facteur ayant 5 niveaux. Les modèles polynômiaux utilisés pour le calcul des besoins de chauffage et de rafraîchissement sont déterminés à partir des plans de couplage n° 2 (voir §4.1.4 et §4.1.5).

Le facteur *Aleclairage* est fixé à son niveau bas (-1), l'éclairage est donc à basse consommation. A chaque point du repère cartésien correspond une valeur pour les besoins de chauffage (abscisse) et une autre pour les besoins de rafraîchissement (ordonnée). Deux graphes sont présentés par climat correspondant respectivement aux besoins de chauffage et de rafraîchissement sans et avec un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait.

Plus le climat est froid, plus l'amplitude des besoins de chauffage est importante. Ceci peut être constaté en comparant la variation des besoins de chauffage entre Nancy, Agen et Nice. Nous remarquons l'inverse pour les besoins de rafraîchissement dont l'intervalle de variation est moins important pour les climats froids par rapport aux climats chauds. Il apparaît également qu'à Nice, il existe de nombreux points dont les besoins de chauffage sont nuls. Ceci montre qu'il est possible de supprimer passivement les besoins de chauffage pour ce climat.

La partie encadrée du domaine représente les points d'expériences auxquels nous nous sommes intéressés. Ces points représentent des niveaux de performances énergétiques élevées, à savoir des besoins de chauffage inférieurs à 35,05 kWh/m².an et des besoins de rafraîchissement inférieurs à 6,73 kWh/m².an. La valeur seuil pour le chauffage correspond à 50% de réduction par rapport à la moyenne des besoins de chauffage à Nancy (climat le plus froid) qui est de 70,1 kWh/m².an. La valeur seuil pour le rafraîchissement correspond à 50% de réduction par rapport à la moyenne des besoins de rafraîchissement à Nice (climat le plus chaud) qui est de 13,46 kWh/m².an.

L'analyse de ces points d'expériences doit permettre de mettre en évidence des solutions permettant d'aboutir à des bâtiments efficaces en termes de performances énergétiques en fonction du climat. Nous avons choisi le même niveau de performances pour les différents climats afin de pouvoir comparer les types de solutions à envisager selon le climat pour respecter les mêmes exigences énergétiques.

L'analyse est effectuée en s'appuyant sur les fréquences cumulées de chaque facteur pour l'ensemble des points d'expériences sélectionnés, c'est-à-dire situés dans la partie encadrée de la Figure 4.38.

La Figure 4.39 montre les résultats obtenus pour les trois climats étudiés. Deux graphes sont présentés pour chaque facteur, correspondants respectivement aux cas ventilation simple flux et ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. La ligne en pointillé est caractéristique d'une distribution uniforme des différents niveaux.

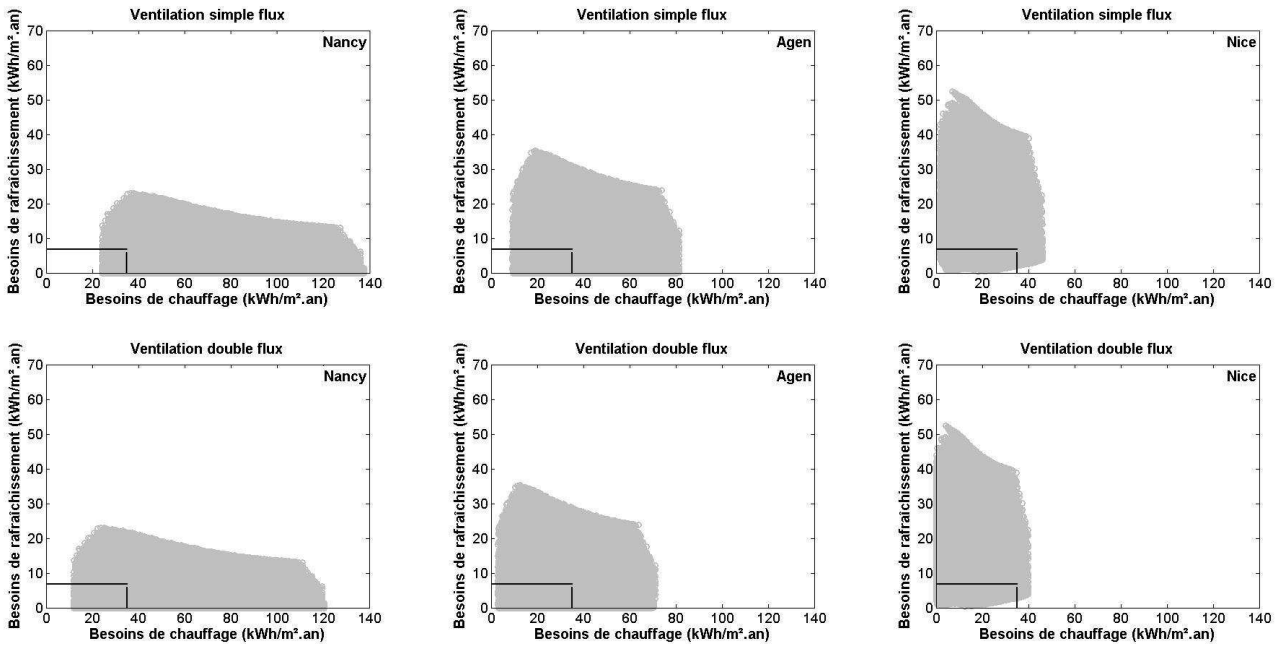
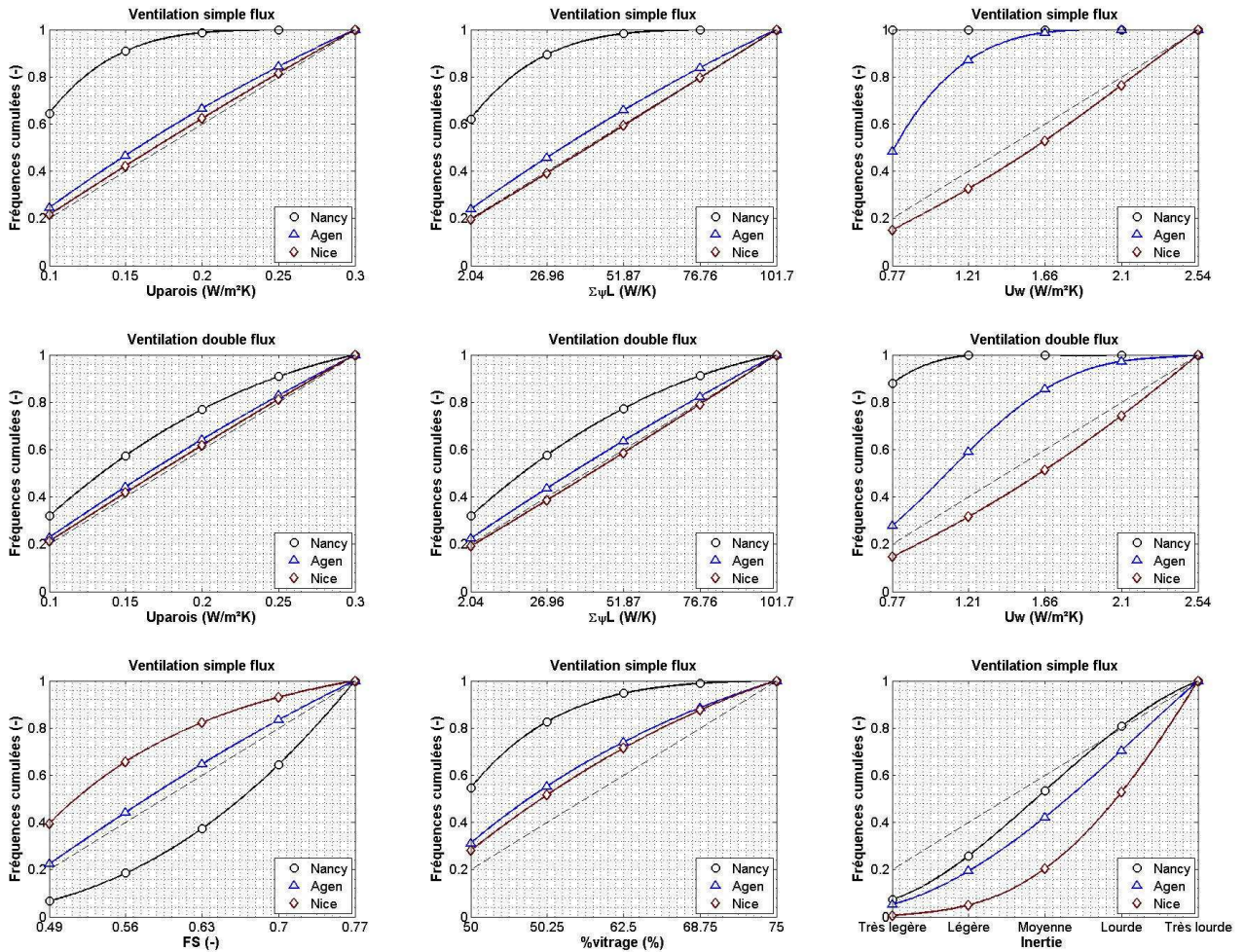


Figure 4.38 : Besoins de chauffage et de rafraîchissement pour Nancy, Agen et Nice



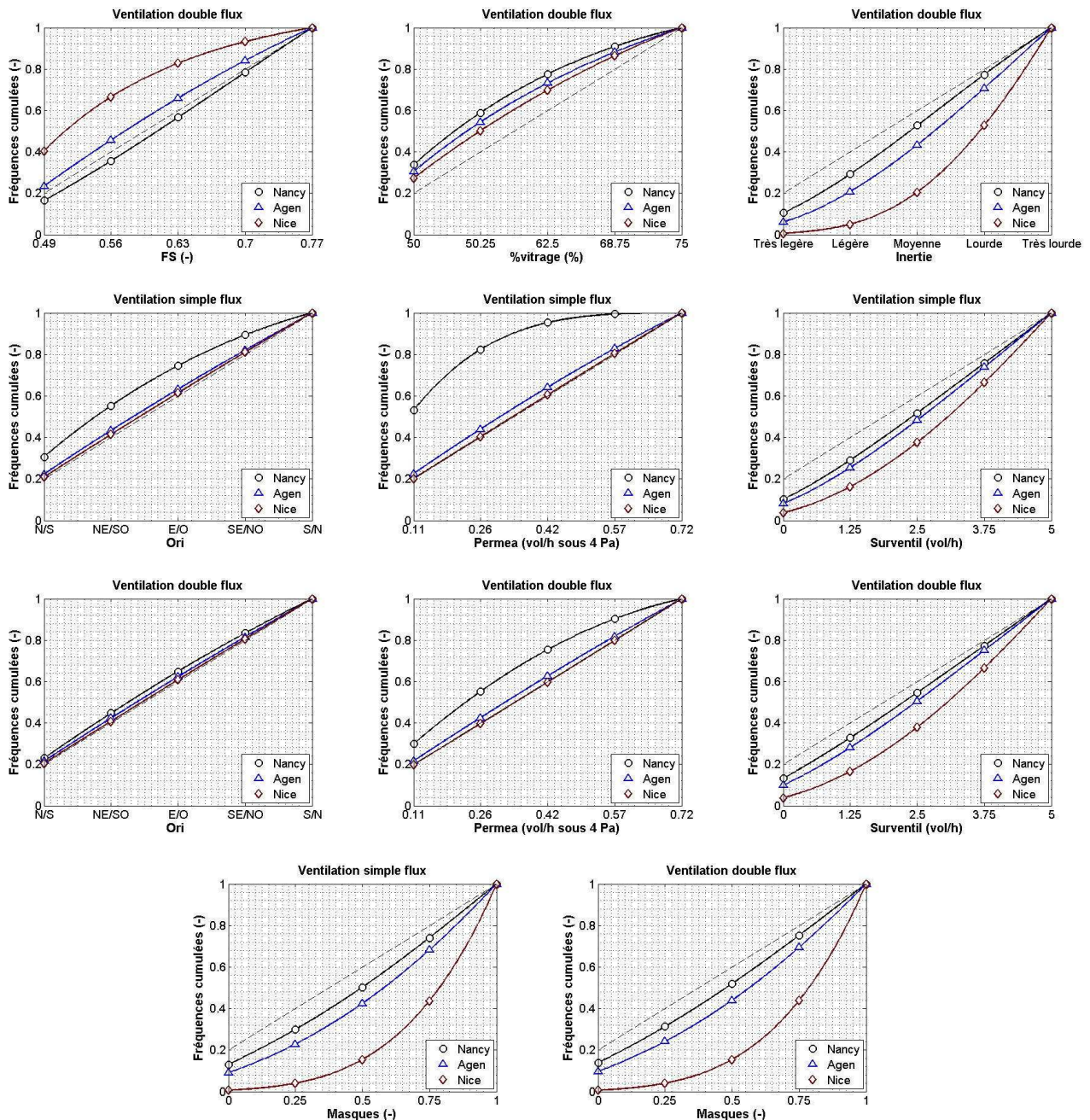


Figure 4.39 : Fréquences cumulées des facteurs pour les cas sélectionnés

Ces résultats nous permettent, pour chaque facteur, de faire les commentaires suivants :

- L'isolation thermique des parois opaques (U_{parois}) :** Ce facteur influence principalement les besoins de chauffage. Les fréquences cumulées obtenues pour Nancy montrent que la majorité des points d'expériences sélectionnés ont un facteur U_{parois} inférieur à 0,2 W/m²K en l'absence de ventilation double flux. Les fréquences cumulées pour les climats d'Agen et de Nice sont proches de la distribution uniforme, démontrant une moindre exigence sur l'isolation thermique des parois opaques par rapport au climat de Nancy. On constate que la fréquence cumulée pour Nancy avec une ventilation double flux se rapproche de la distribution uniforme ce qui signifie une réduction sur le niveau d'exigence de l'isolation thermique des parois opaques qui reste cependant supérieure à celles d'Agen et de Nice.
- Les ponts thermiques ($\sum \psi L$) :** Les remarques faites pour l'isolation thermique des parois opaques (U_{parois}) sont également valables pour les ponts thermiques. En effet, les fréquences cumulées obtenues pour Nancy en absence de la ventilation

double flux, montre que facteur le $\sum \psi L$ reste proche de son niveau bas tandis que pour Agen et Nice les fonctions de distribution sont quasi uniformes. La ventilation double flux permet également de réduire les exigences sur les ponts thermiques pour Nancy, mais ces exigences restent supérieures à celles d'Agen et de Nice.

- **Le coefficient de transmission des parois vitrées (U_w)** : Les exigences pour les coefficients de transmission des parois vitrées sont supérieures à celles pour l'isolation thermique des parois opaques (U_{parois}) et des ponts thermiques ($\sum \psi L$). En l'absence d'une ventilation double flux, U_w reste sur tout le domaine de variation à son niveau bas de 0,77 W/m²K à Nancy et proche de ce niveau à Agen. Le climat de Nice étant chaud comparé aux autres climats étudiés, la répartition est quasi uniforme pour Nice. La présence de la ventilation double flux réduit également les exigences sur ce facteur.
- **Le facteur solaire des parois vitrées (FS)** : Ce facteur a plus d'influence sur les besoins de rafraîchissement que sur les besoins de chauffage. La distribution des niveaux est quasi uniforme pour Agen. La distribution pour Nancy est favorable aux niveaux hauts, surtout en l'absence de la ventilation double flux, où il devient nécessaire de favoriser les apports solaires pour atteindre des niveaux bas pour les besoins de chauffage. Pour Nice, la distribution est favorable aux niveaux bas. En effet, ce climat est caractérisé par des flux solaires plus importants que les autres climats. Le facteur solaire a donc un impact significatif sur les besoins de rafraîchissement qui doivent être limités en réduisant le facteur solaire des parois vitrées.
- **Le pourcentage de surfaces vitrées (%vitrage)** : Ce facteur influence de manière significative les besoins de chauffage et de rafraîchissement. Plus le pourcentage de surfaces vitrées augmente, plus les besoins de chauffage et de rafraîchissement augmentent. Ceci se traduit par des fréquences cumulées pour les trois climats qui favorisent les niveaux bas surtout pour Nancy en l'absence de la ventilation double flux.
- **L'inertie thermique du bâtiment ($Inertie$)** : L'inertie thermique est un facteur qui agit principalement sur les besoins de rafraîchissement, son effet sur les besoins de chauffage étant limité. Les fréquences cumulées favorisent les niveaux hauts. Plus le climat est chaud, plus l'inertie doit être élevée afin d'atteindre les exigences visées en besoins de rafraîchissement.
- **L'orientation du bâtiment (Ori)** : L'orientation du bâtiment a un impact limité sur les besoins de chauffage et de rafraîchissement. Les fréquences cumulées sont quasi uniformes pour Agen et Nice, et également pour Nancy avec la ventilation double flux. En l'absence du double flux à Nancy, il est nécessaire de favoriser les apports solaires afin de pouvoir respecter les limites fixées pour les besoins de chauffage. Les fréquences cumulées montrent que les solutions sont favorables aux orientations Nord/Sud et Nord-Est/Sud-Ouest.
- **La perméabilité à l'air du bâtiment ($Permea$)** : Ce facteur influence principalement les besoins de chauffage, son effet sur les besoins de rafraîchissement est limité. Les fréquences cumulées sont quasi uniformes pour Agen et Nice. Pour le climat de Nancy, les fréquences cumulées montrent que la perméabilité à l'air doit être faible surtout en l'absence de ventilation double flux à savoir inférieure à 0,57 vol/h sous 4 Pa.
- **La surventilation nocturne ($Surventil$)** : La surventilation nocturne agit uniquement sur les besoins de rafraîchissement. Plus de 60% des solutions à Nice et plus de 50% à Agen et Nancy ont un débit de surventilation nocturne supérieur à 2,5 vol/h.

- **Les masques solaires (Masques) :** Les masques ont un impact significatif sur les besoins de rafraîchissement. Le climat de Nice très ensoleillé nécessite de se protéger du soleil de manière plus importante que les autres climats et a donc des fréquences cumulées plus favorables aux niveaux élevés. Les distributions pour Nancy et Agen sont proches d'une distribution uniforme.

4.3.3 Analyse de solutions performantes pour les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle

Dans cette partie, nous nous intéressons à des solutions permettant d'aboutir à des bâtiments à basse consommation d'énergie respectant simultanément les exigences du label allemand Passivhaus et du label français Effinergie. Rappelons les critères de ces deux labels :

- **Passivhaus :** ce label exige des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an et une consommation annuelle d'énergie primaire inférieure à 120 kWh/m².an pour le chauffage, l'eau chaude et les autres usages (incluant les applications domestiques),
- **Effinergie :** le label Effinergie exige une consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux, inférieure ou égale à 50 % de la consommation référence de la réglementation thermique RT2005.

En considérant la consommation d'énergie primaire du bâtiment pour la configuration de référence comme étant la consommation de référence de la réglementation thermique, il s'agit donc de chercher des solutions permettant de réduire cette consommation de 50% pour aboutir à un bâtiment respectant le label Effinergie. Soulignons que la consommation conventionnelle d'énergie primaire dans la réglementation thermique ne prend pas en compte la consommation d'électricité due aux équipements de bureautique qui est de 9,83 kWh/m².an pour le bâtiment. Cette consommation est, en revanche, prise en compte dans le label Passivhaus.

Nous allons comparer les exigences d'Effinergie pour l'énergie primaire avec celle de Passivhaus et en retenir les exigences maximales. Le Tableau 4.19 donne la consommation d'énergie primaire du bâtiment de référence sans et avec la prise en compte des consommations des équipements de bureautique.

Climat	Energie primaire (kWh/m ² .an)	
	Avec bureautique	Sans bureautique
Nancy	218,11	192,75
Agen	178,15	152,79
Nice	161,00	135,64

Tableau 4.19 : Consommation d'énergie primaire du bâtiment de référence sans et avec la consommation des équipements de bureautique

Les exigences pour le label Effinergie sont calculées en réduisant la consommation d'énergie primaire du bâtiment pour la configuration de référence de 50% sans réduire la partie due aux équipements de bureautique, c'est-à-dire que nous allons diviser par deux les valeurs présentées dans le Tableau 4.19 de la consommation d'énergie primaire sans la consommation de la bureautique, et que nous allons rajouter aux valeurs obtenues 25,36 kWh/m².an qui représente la consommation de la bureautique.

Sur le Tableau 4.20 sont portées les exigences pour la consommation d'énergie primaire des labels Effinergie et Passivhaus. Pour Nancy, l'exigence du Passivhaus est supérieure à celles d'Effinergie, elle est donc retenue pour la recherche de solutions. On constate l'inverse pour Agen et Nice, où les exigences d'Effinergie sont supérieures à celles du Passivhaus et sont donc retenues pour la recherche de solutions.

Climat	Exigences Effinergie en énergie primaire (kWh/m ² .an)	Exigences Passivhaus en énergie primaire (kWh/m ² .an)
Nancy	121,74	120,0
Agen	101,76	120,0
Nice	93,18	120,0

Tableau 4.20 : Exigences des labels Effinergie et Passivhaus en énergie primaire

En supposant des consommations uniquement électriques pour les systèmes de production d'énergie (pompe à chaleur air-air, géothermique, ...), les exigences sur l'énergie primaire peuvent être transformées en exigences en énergie finale annuelle à l'aide du facteur de conversion de l'énergie finale électrique en énergie primaire de 2,58 (Réglementation thermique, 2005) (voir Tableau 4.21). Soulignons que ce facteur de conversion n'est pas le même selon le pays, il est par exemple égal à 2,7 pour l'Allemagne (PHPP, 2004).

Climat	Exigences en énergie finale annuelle (kWh/m ² .an)
Nancy	46,51
Agen	39,44
Nice	36,12

Tableau 4.21 : Exigences pour les consommations d'énergie finale annuelle

Les modèles polynômiaux des besoins de chauffage et des consommations d'énergie finale sont utilisés pour identifier des solutions permettant d'établir des bâtiments selon les exigences des labels Passivhaus et Effinergie. Le modèle polynômial pour le calcul des besoins de chauffage est déterminé à partir du plan d'expériences de couplage n°2 (voir §4.1.4). Celui pour le calcul de la consommation d'énergie finale annuelle est également déterminé à partir d'un plan d'expériences de couplage (voir §4.1.6). Nous allons rechercher à l'aide de ces modèles polynômiaux des solutions présentant simultanément des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an et des consommations d'énergie finales annuelles inférieures aux valeurs limites indiquées dans le Tableau 4.21.

La Figure 4.40 montre les consommations d'énergie finale annuelle et les besoins de chauffage pour les climats de Nancy, Agen et Nice. Ces consommations et besoins de chauffage ont été calculés pour tout le domaine d'étude à l'aide des modèles polynômiaux, chaque facteur ayant 5 niveaux.

Le nombre de points d'expériences présentés dans la Figure 4.40 est de 10 millions de points, ceci est équivalent à un plan complet de 10 facteur à 5 niveaux chacun. Aller au delà de 10 millions de points a posé des problèmes d'ordre technique liés au logiciel MATLAB utilisé pour réaliser cette analyse. Nous avons pu faire varier au maximum 10 facteurs ayant chacun cinq niveaux. Il fallait donc fixer à un niveau donné, 3 facteurs parmi les 13 que comprend le plan de modélisation de la consommation d'énergie finale annuelle. Les trois facteurs qui ont été fixés sont *Aleclairage*, *Ori* et *Permea*. Ils sont maintenus à leurs niveaux bas (-1) qui correspond à un éclairage à basse consommation pour le facteur *Aleclairage*, à une perméabilité à l'air de 0,11 vol/h sous 4 Pa pour le facteur *Permea* (valeur recommandée par le label Passivhaus) et une orientation Nord/Sud du bâtiment pour le facteur *Ori*. Les niveaux choisis pour le facteur *Ori* et *Permea* sont des niveaux qui permettent de réduire les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale (voir §4.2.2 et §4.2.4).

Dans le domaine d'étude, nous allons nous intéresser uniquement aux points permettant d'établir des bâtiments selon les exigences des labels Passivhaus et Effinergie, à savoir des besoins de chauffage inférieurs ou égaux à 15 kWh/m².an et des consommations d'énergie finale inférieures aux valeurs limites indiquées dans le Tableau 4.21 (cadre sur la Figure 4.40).

La Figure 4.41 montre les fréquences cumulées de chaque facteur pour l'ensemble des points sélectionnés.

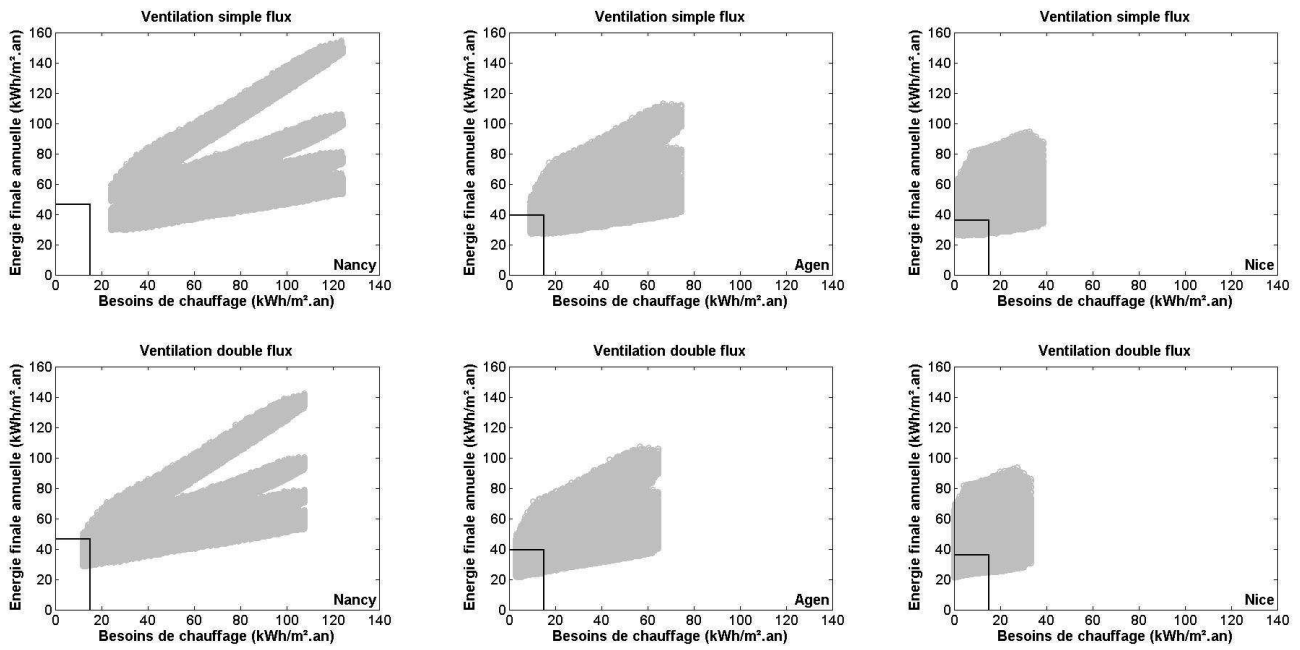
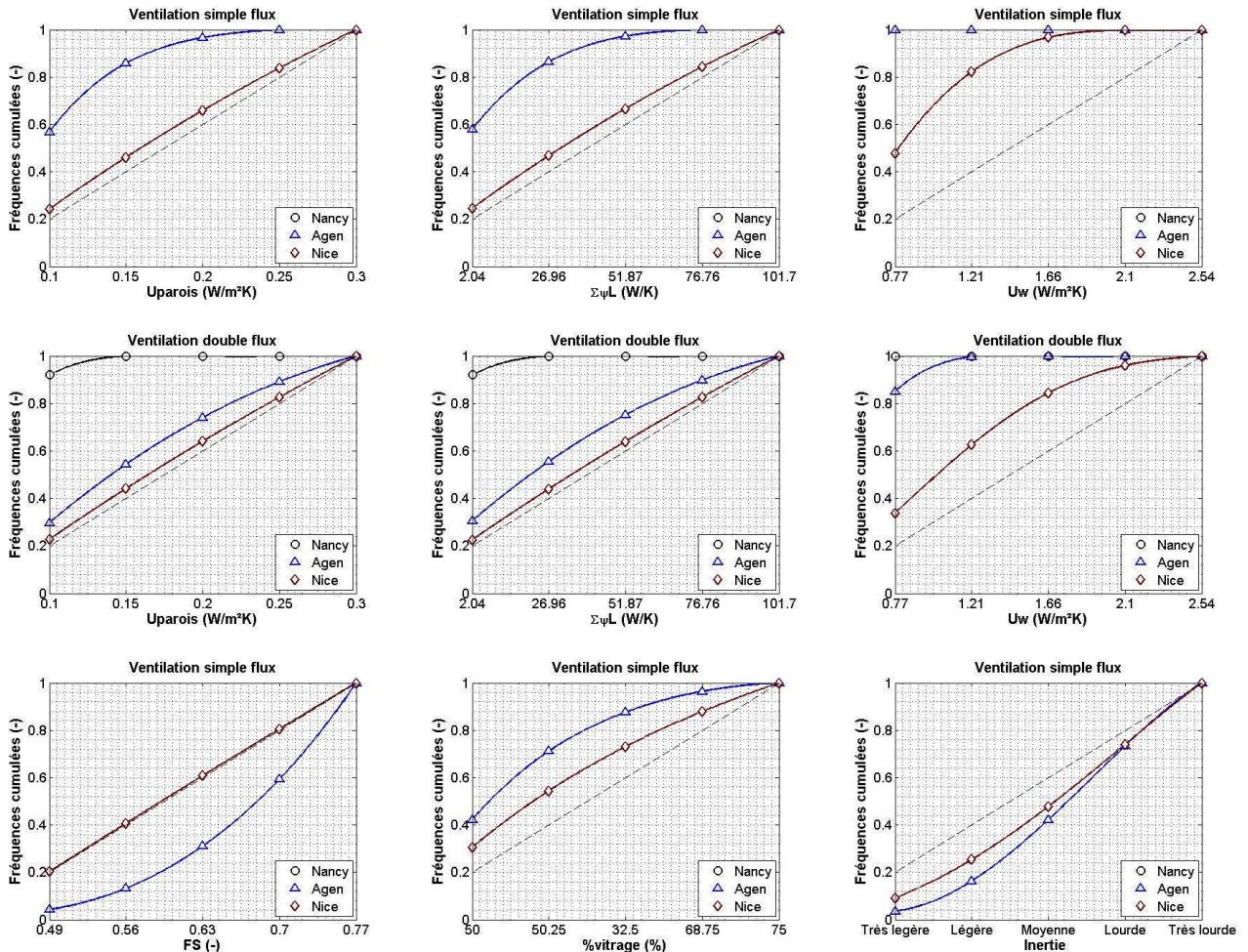


Figure 4.40 : Consommations d'énergie finale annuelle et besoins de chauffage pour Nancy, Agen et Nice



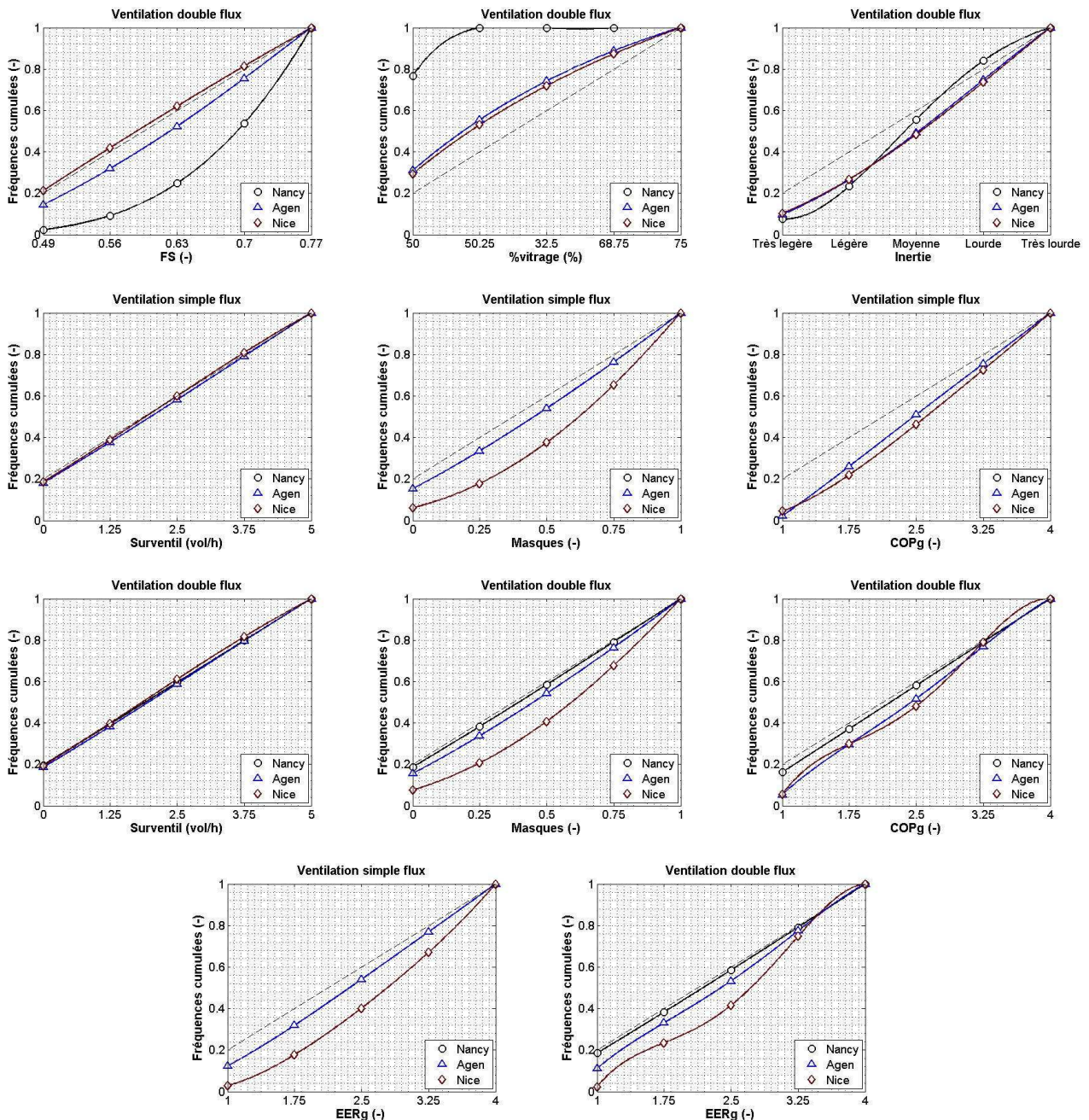


Figure 4.41 : Fréquences cumulées des facteurs pour les cas respectant les exigences des labels Passivhaus et Effinergie

Pour chaque climat nous pouvons faire les commentaires suivants :

- Nancy** : Atteindre le label Passivhaus pour le contexte climatique de Nancy nécessite des efforts considérables en termes d'isolation thermique de l'enveloppe et de réduction des déperditions par ventilation. On constate qu'il est nécessaire d'accompagner l'amélioration de l'isolation de l'enveloppe par la mise en place d'un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. En l'absence de la ventilation double flux, il est impossible d'atteindre des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an.

Atteindre les exigences des deux labels nécessite une attention particulière pour réduire les besoins de chauffage du bâtiment en utilisant une ventilation double flux et en améliorant l'isolation de l'enveloppe. Les facteurs directement influents l'isolation thermique de l'enveloppe, à savoir U_{parois} , $\sum \psi L$, U_w et $\%vitrage$, restent à des niveaux très bas. Ceci signifie qu'un bâtiment passif doit, en premier lieu, avoir

une enveloppe très isolée, à savoir un coefficient de transmission thermique des parois opaques inférieur à $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, peu de pertes par les ponts thermiques, et une réduction de la superficie des parois vitrées qui doivent être en triple vitrage. Nous rappelons que la perméabilité à l'air est au niveau bas, à savoir $0,11 \text{ vol/h}$ sous 4 Pa .

Le facteur solaire des parois vitrées est majoritairement supérieur à $0,56$. Ceci montre la nécessité de favoriser les apports solaires en période hivernale. L'inertie à un effet limité sur le chauffage. Sa distribution favorise les niveaux hauts pour réduire les besoins de rafraîchissement. Les facteurs *Surventil*, *Masques* et *EER_g* qui affectent la consommation d'énergie liée au rafraîchissement, ont une distribution uniforme. Ceci signifie que le rafraîchissement n'est pas un point primordial pour ce climat.

La fréquence cumulée pour le facteur *COP_g* présente une distribution uniforme. En effet, vu que les besoins de chauffage sont inférieurs ou égaux à $15 \text{ kWh/m}^2\text{an}$, c'est-à-dire très faibles, il n'existe pas de contraintes majeures sur les performances du système de chauffage pour respecter les exigences du label Effinergie à Nancy, le coefficient de performance peut même être égal à 1.

- **Agen** : Le climat d'Agen est modéré comparé à celui de Nancy. On constate qu'il est possible d'atteindre des besoins de chauffage inférieurs ou égaux à $15 \text{ kWh/m}^2\text{an}$, malgré l'absence d'une ventilation double flux avec récupération de chaleur. Ceci exige par contre des efforts sur l'isolation thermique de l'enveloppe, à savoir un triple vitrage avec une couche faible émissivité, un coefficient de transmission des parois opaques inférieur à $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ et une réduction des ponts thermique ($\sum \psi L \leq 76 \text{ W/K}$). Le pourcentage de parois vitrées doit être limité en été et les gains solaires sont à favoriser en période hivernale. Rappelons que la perméabilité à l'air est également à son niveau bas, à savoir $0,11 \text{ vol/h}$ sous 4 Pa . Ces exigences sont réduites en présence de la ventilation double flux.

Les fréquences cumulées pour le facteur *COP_g* montrent que celui-ci est favorable aux niveaux hauts. On constate donc des exigences relativement plus sévères pour ce facteur à Agen qu'à Nancy. En effet, vu que les besoins de chauffage des points sélectionnés sont aux mêmes niveaux pour les deux climats ($\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{an}$) et vu que les exigences en termes de consommation d'énergie annuelle sont plus sévères à Agen qu'à Nancy, à savoir $39,44 \text{ kWh/m}^2\text{an}$ contre $46,51 \text{ kWh/m}^2\text{an}$, il est nécessaire d'avoir un système de chauffage plus performant à Agen qu'à Nancy.

Les fréquences cumulées pour le facteur *Masques* est plus proche des niveaux hauts par rapport à Nancy. Ceci indique que les besoins de rafraîchissement sont plus importants pour ce climat en comparaison avec Nancy. Les fréquences cumulées de l'inertie favorisent les niveaux hauts pour réduire les besoins de rafraîchissement.

Les fréquences cumulées pour le facteur *EER_g* sont légèrement favorable aux niveaux hauts. Ceci indique des exigences relativement plus sévères pour ce facteur comparé à Nancy. Ceci est dû à des besoins de rafraîchissement plus important et des exigences en termes de consommation d'énergie annuelle plus sévères à Agen qu'à Nancy.

Les fréquences cumulées des autres facteurs sont proches d'une distribution uniforme ce qui permet d'envisager de nombreuses solutions pour ces facteurs.

- **Nice** : Le climat de Nice est chaud comparé aux climats de Nancy et Agen. Atteindre des besoins de chauffage inférieurs à $15 \text{ kWh/m}^2\text{an}$ est relativement facile que ce soit avec ou sans la ventilation double flux. Il est même possible d'atteindre des

besoins nuls en chauffage. A part le facteur U_w , la distribution des facteurs relatifs à l'isolation thermique de l'enveloppe est quasi uniforme.

Les fréquences cumulées sont favorables aux niveaux élevés pour les facteurs $Masques$ et EER_g . Ceci signifie que les exigences sur ces facteurs sont plus sévères à Nice comparé aux autres climats.

La distribution du facteur $Surventil$ est quasi-uniforme. Ceci est dû à l'effet de la surventilation nocturne sur la consommation d'énergie annuelle (voir §4.2.4). Cet effet est faible et positif c'est-à-dire que l'augmentation en termes de consommation d'énergie annuelle des auxiliaires de la surventilation mécanique est plus importante que la réduction en besoins de rafraîchissement, une surventilation nocturne naturelle ou hybride est donc conseillée lorsque cela est possible.

La distribution du facteur COP_g montre que les exigences sur ce facteur sont très proches de celles d'Agen et ceci malgré que le climat de Nice soit plus chaud que le climat d'Agen. En effet, les points sélectionnés pour les deux climats présentent des besoins de chauffage de même niveau ($\leq 15 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$) et des consommations d'énergie annuelle inférieures à Nice, à savoir $39,44 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$ contre $36,11 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$.

4.3.4 Analyse de solutions performantes pour la consommation d'énergie finale annuelle

La Figure 4.42 montre les consommations d'énergie finale pour les trois climats étudiés, calculés dans tout le domaine d'étude à l'aide des polynômes déterminés par la méthode des plans d'expériences, chaque facteur ayant 5 niveaux. Le modèle polynômial utilisé pour le calcul de la consommation d'énergie annuelle est déterminé à partir du couplage d'un plan d'expérience couplé (voir §4.1.6).

Pour le domaine d'étude considéré, nous allons nous intéresser uniquement aux points permettant d'établir des bâtiments selon les exigences du label Effinergie, à savoir des consommations d'énergie finales annuelles inférieures aux valeurs limites indiquées dans le Tableau 4.21. Ces points se situent en dessous des lignes horizontales de la Figure 4.42 pour le cas ventilation double flux, et à gauche des lignes verticales pour le cas ventilation simple flux. Les facteurs $Aleclairage$, Ori et $Permea$ sont toujours fixés à leurs niveaux bas (-1) (voir §4.3.3).

Sur la Figure 4.42, nous avons tracé également la bissectrice. On constate qu'en passant de Nancy, à Agen et puis à Nice, les points d'expériences se rapprochent de cette bissectrice, ce qui montre que l'intérêt énergétique de la ventilation double flux diminue en passant d'un climat froid à un climat chaud.

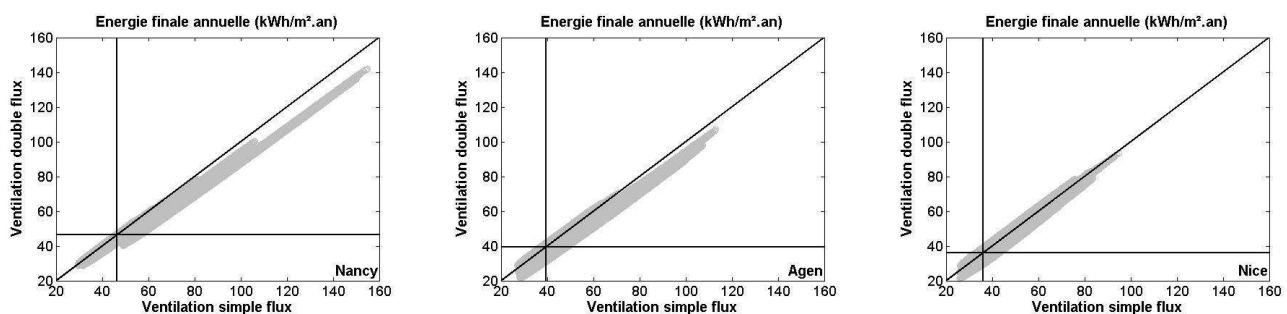
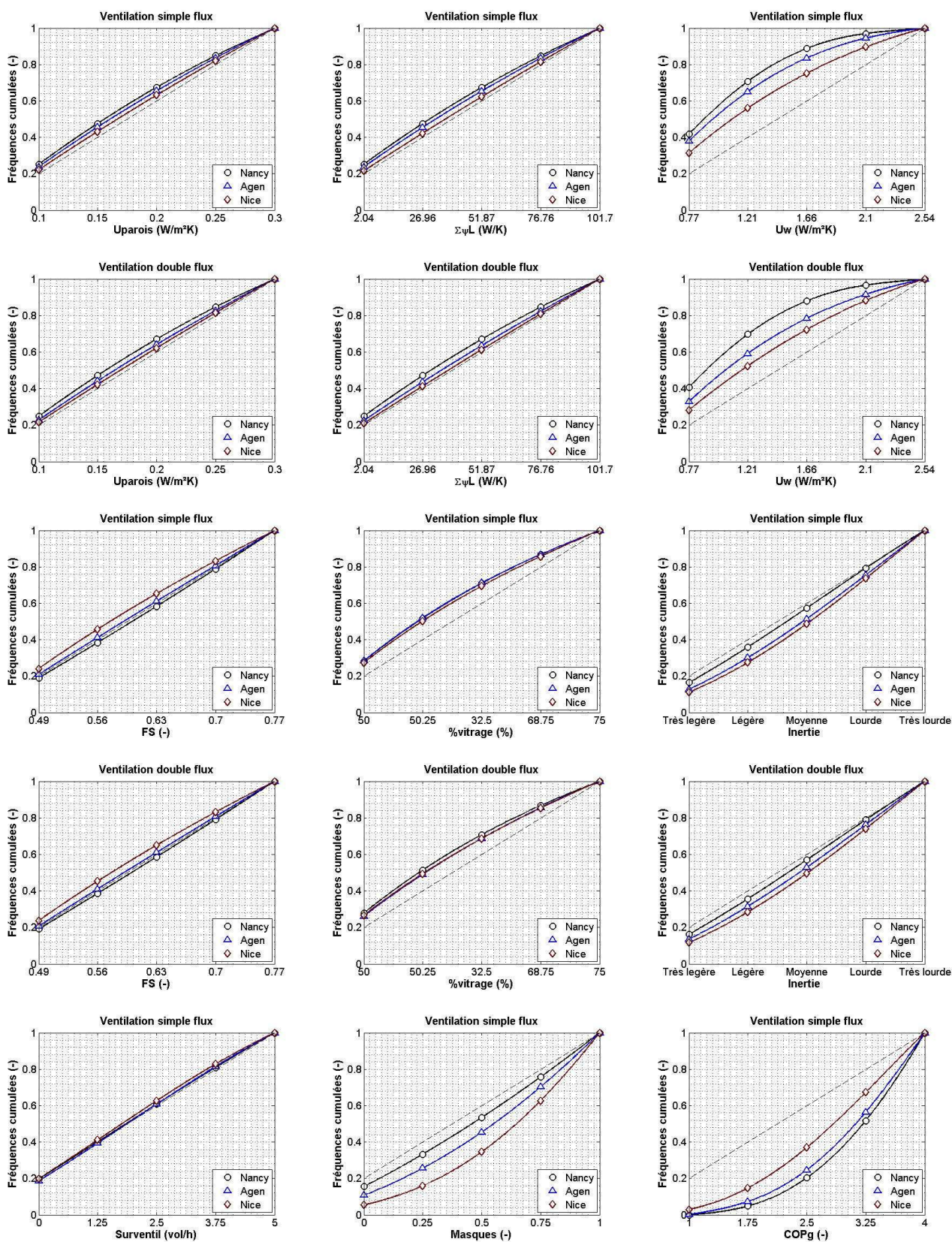


Figure 4.42 : Consommation d'énergie finale annuelle pour Nancy, Agen et Nice

La Figure 4.43 montre les fréquences cumulées de chaque facteur pour l'ensemble des points sélectionnés.



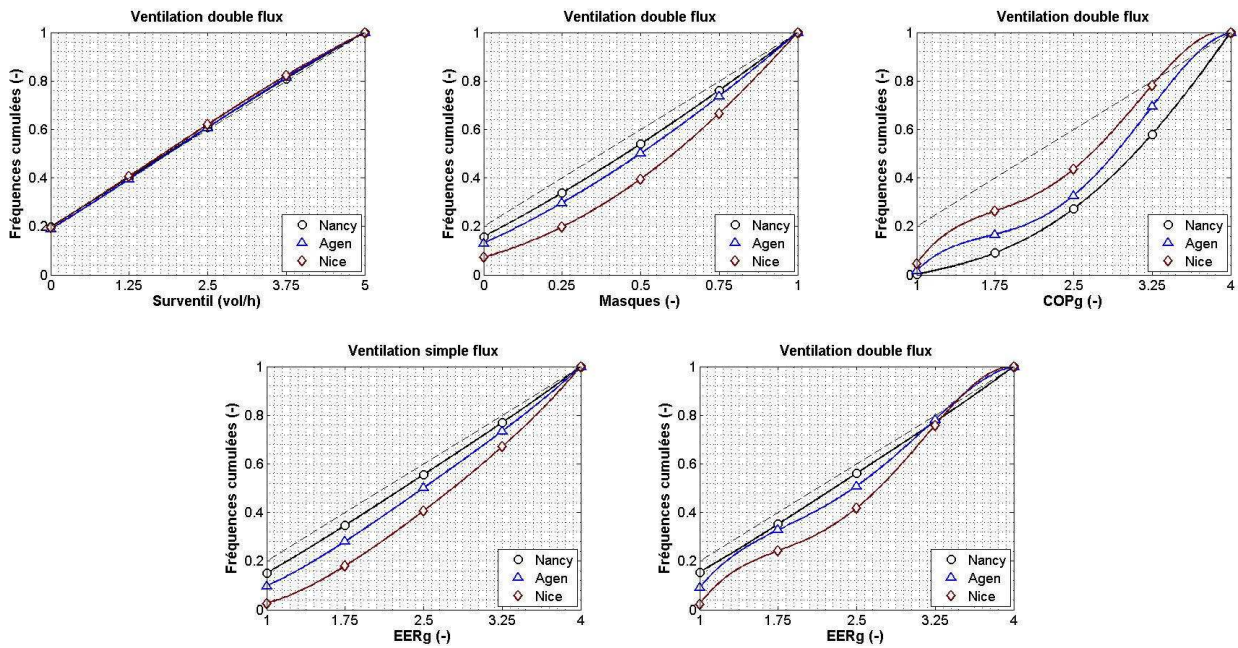


Figure 4.43 : Fréquences cumulées des facteurs pour les cas respectant le label Effinergie

Les principales différences par rapport aux résultats de l'analyse de solutions performantes pour le chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle (voir §4.3.3) concernent les facteurs influents sur les besoins de chauffage :

- On note des exigences moindres sur les facteurs de l'enveloppe U_{parois} , $\sum \psi L$, U_w et $\% \text{vitrage}$. Ceci est dû au fait que nous n'avons pas imposé de limite basse pour les besoins de chauffage. Ces facteurs ont des fréquences cumulées assez proches pour les trois climats, ce qui implique des niveaux d'isolation thermique proches pour atteindre les exigences du label Effinergie. Ce qui peut paraître a priori contradictoire.

En effet, les exigences du label Effinergie en consommation d'énergie finale annuelle est de 46,51 kWh/m².an pour Nancy, de 39,44 kWh/m².an pour Agen et de 36,11 kWh/m².an pour Nice. Ces exigences plus sévères pour les climats chauds se traduisent par un niveau d'isolation proche malgré un climat moins froid.

- Les exigences sur le facteur COP_g pour Nancy et Agen sont plus sévères tandis que les exigences pour Nice sont moins contraignantes. Il apparaît donc que vu les caractéristiques d'isolation de l'enveloppe, un effort doit être fait sur la performance du système de chauffage.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé à l'aide de la simulation numérique et de la méthode des plans d'expériences, des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétique et du confort thermique d'été du bâtiment Beethoven. Ces modèles polynômiaux peuvent remplacer la simulation numérique pour réaliser des études de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Ils ont été développés pour les climats de Nancy, Agen et Nice.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons mis en évidence les limites de la méthode des plans d'expériences standards. Cette méthode permet d'évaluer les besoins de chauffage et la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne avec une précision acceptable, mais ne présente pas une précision satisfaisante pour la détermination des besoins de rafraîchissement, du confort thermique et de la consommation d'énergie annuelle. En effet, cette méthode n'est pas adaptée à des études

prenant en compte un grand nombre de paramètres à variations importantes non linéaires, comme c'est souvent le cas des études paramétriques de conception des bâtiments à basse consommation d'énergie.

Ainsi, nous avons développé une méthodologie permettant de contourner cette difficulté en adaptant la méthode des plans d'expériences au problème que l'on cherche à résoudre. Cette méthodologie s'applique de manière séquentielle et consiste à coupler des plans d'expériences standards de manière à intégrer de nouveaux coefficients aux modèles polynômiaux et améliorer ainsi leur qualité en obtenant plus de précision sur les réponses modélisées. Le nombre de simulations numériques annuelles effectuées pour déterminer un modèle polynômial d'un plan de couplage varie entre 200 et 377 simulations. La méthodologie développée nous a permis d'obtenir des modèles polynômiaux d'une précision satisfaisante pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie finale annuelle. La précision sur l'évaluation du confort thermique d'été est moins satisfaisante, son amélioration nécessite un investissement plus important en nombre de simulations numériques.

L'intérêt de ces modèles c'est le fait qu'ils peuvent servir à évaluer les performances de toutes les configurations possibles de facteurs dans le domaine d'étude, qui atteignent parfois des millions. Ceci permet de simplifier la réalisation des études paramétriques, en limitant le recours à la simulation numérique pour la recherche de solutions.

Ensuite, nous avons mis en œuvre les modèles polynômiaux pour réaliser une étude de sensibilité sur les performances énergétiques et le confort thermique du bâtiment Beethoven. Cette étude a permis d'une part, d'évaluer la précision des différents plans d'expériences standards et de couplage pour réaliser des études de sensibilité ; et d'autres part de mettre en évidence les facteurs les plus influents sur les performances énergétiques et le confort thermique du bâtiment.

Nous avons utilisé également les modèles polynômiaux pour analyser des solutions permettant de concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie. Cette analyse a permis de mettre en évidence plusieurs conclusions. Elle a montré par exemple, qu'atteindre des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an selon les exigences du label Passivhaus, nécessite l'utilisation d'une ventilation double flux pour le climat de Nancy avec une isolation thermique bien soignée pour l'enveloppe. La ventilation double flux n'est pas nécessaire pour les climats d'Agen et de Nice, où une bonne qualité de l'enveloppe suffit. L'utilisation de la ventilation double flux permet de réduire les exigences sur l'isolation de l'enveloppe pour ces deux climats.

Les modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétique et du confort thermique d'été du bâtiment Beethoven étant développés, nous allons dans le chapitre suivant utiliser ces polynômes, pour améliorer la configuration de référence du bâtiment Beethoven, afin d'obtenir un bâtiment à basse consommation d'énergie pour Nancy, Agen et Nice.

Exemple d'application des modèles polynômiaux pour concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie

Après le développement dans le chapitre 4 des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétiques et du confort thermique d'été du bâtiment Beethoven, nous proposons de mettre en œuvre ces polynômes afin d'identifier des solutions pour la configuration de référence de ce bâtiment, dans le but d'obtenir un bâtiment à basse consommation d'énergie pour les climats de Nancy, Agen et Nice.

Le début de ce chapitre est consacré à la définition des objectifs de la recherche de solutions et la description de la démarche suivie pour effectuer cette recherche. Ensuite, nous présentons les travaux de recherche de solutions pour les trois climats.

Les configurations basse consommation identifiées sont comparées à la configuration de référence en termes de performances énergétiques et d'émission de CO₂.

A travers cet exemple d'application, nous allons mettre en évidence les points forts de la méthodologie que nous proposons. En effet, grâce aux modèles polynômiaux développés, nous allons sans la simulation numérique produire des abaques pour la sélection de solutions ce qui permettra de guider le choix de solutions.

5.1 Définition des objectifs visés pour la recherche de solutions basse consommation

Les modèles polynômiaux développées précédemment sont mis en œuvre pour identifier des solutions pour la configuration de référence du bâtiment Beethoven afin d'atteindre les exigences des labels Passivhaus et Effinergie, tout en gardant le même niveau de confort thermique d'été, c'est-à-dire une température opérative intérieure inférieure à 26 °C en période d'été. Les climats considérés sont Nancy, Agen et Nice. La démarche suivie pour la recherche des solutions est présentée dans ce qui suit.

Dans le Tableau 5.1 nous rappelons les exigences des deux labels qui consistent en des limites pour les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment (voir chapitre 4, §4.3.3).

Climat	Limites pour les besoins de chauffage (kWh/m².an)	Limites pour la consommation d'énergie finale (kWh/m².an)
Nancy	15	46,51
Agen		39,44
Nice		36,12

Tableau 5.1 : Exigence des labels Passivhaus et Effinergie pour les climats étudiés

Il est donc défini des exigences pour les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle. De plus, nous avons choisi d'étudier trois solutions pour le rafraîchissement du bâtiment :

- La première consiste à réduire les besoins de rafraîchissement et de couvrir le solde des besoins à l'aide d'un système actif dont l'efficacité globale EER_g est à définir.

Nous désignons par « système actif », des systèmes thermodynamique à compression utilisant l'électricité comme énergie (PAC air-eau, eau-eau, etc...)

- La deuxième solution consiste à le rafraîchir à l'aide d'une surventilation mécanique nocturne.
- La troisième solution consiste à le rafraîchir à l'aide d'une surventilation mécanique nocturne associée à un puits climatique.

5.2 Description de la démarche suivie pour la recherche de solutions basse consommation

La démarche que nous avons adoptée pour la recherche de solutions consiste à utiliser les modèles polynômiaux des besoins de chauffage, de rafraîchissement et de la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne pour identifier des solutions pour l'enveloppe et les systèmes de ventilation mécanique permettant de réduire les besoins de chauffage et de rafraîchissement. Ensuite, les performances adéquates des systèmes de production d'énergie sont déterminées à l'aide des modèles polynômiaux de la consommation d'énergie finale pour atteindre les objectifs visés en consommation d'énergie finale annuelle.

D'une manière générale, il est possible de suivre d'autres démarches pour choisir des solutions pour la conception d'un bâtiment. A titre d'exemple, on peut se servir directement des modèles polynômiaux de la consommation d'énergie finale annuelle pour identifier les solutions permettant de respecter les exigences énergétiques visées. Toutefois, si l'on se fixe des exigences pour les besoins de chauffage et les besoins de rafraîchissement, il devient indispensable de commencer par la conception de l'enveloppe et de la ventilation mécanique pour respecter ces exigences. Ceci est, par ailleurs, le cas d'application que traite ce chapitre, d'où le choix de la démarche que nous proposons.

Nous rappelons que le nombre total de facteurs considérés pour l'évaluation des performances énergétique du bâtiment est de 13 (voir chapitre 4, §4.1.2). Il s'agit donc d'identifier la ou les configurations possibles de ces 13 facteurs, permettant de respecter les exigences que nous nous sommes fixées pour les besoins de chauffage, pour les besoins de rafraîchissement et pour la consommation d'énergie finale annuelle.

Nous fixons a priori les niveaux de deux facteurs, à savoir *Ori* et *Aleclaire*, réduisant ainsi le nombre d'inconnues à 11. Nous rappelons que l'analyse de sensibilité sur ces facteurs montre que le facteur *Ori* a un effet réduit sur les performances énergétiques du bâtiment (voir chapitre 4, §4.2). Ce facteur est donc fixé à son niveau bas (-1), ce qui implique une orientation Nord-Sud du bâtiment. D'autre part, l'analyse des performances énergétiques de la configuration de référence montre que le poste éclairage constitue le deuxième poste de consommation d'énergie derrière le chauffage à Nancy et Agen, et le premier poste à Nice (voir chapitre 3, §3.1.7.4). De plus, il a été montré que l'éclairage a un effet important sur cette consommation. La réduction de la consommation d'énergie due à ce poste est indispensable, d'où le choix du niveau bas (-1) pour le facteur *Aleclaire*. Le choix de ce niveau, permet d'obtenir une réduction des consommations d'énergie finale annuelle pour l'éclairage artificiel de 45,4 % par rapport à la configuration de référence.

La démarche que nous avons adoptée pour l'identification des 11 inconnues restantes à l'aide des modèles polynômiaux, est divisée en trois étapes :

- **Etape 1** : Cette étape consiste à sélectionner la configuration requise des facteurs qui influencent les besoins de chauffage, de manière à obtenir des besoins inférieurs ou égaux à 15 kWh/m².an.

L'analyse de sensibilité pour les besoins de chauffage a montré que les facteurs dont l'influence est significative sont nombreux, à savoir *Uparois*, $\sum \psi L$, *Uw*, *%vitrage*, *Permea* et *FS* (voir chapitre 4, §4.2.2). L'effet du facteur *Inertie* sur les besoins de chauffage est limité, le choix de son niveau dépendra des besoins de rafraîchissement dont la réduction fera l'objet de la deuxième étape.

Vu le nombre important de facteurs à prendre en compte pour réduire les besoins de chauffage, il nous semble complexe de définir des abaques de sélection de solutions, à l'image des abaques présentées dans le chapitre 3 (voir chapitre 3, §3.3.3). Ceci serait a priori possible, s'il existait des contraintes supplémentaires sur le choix des solutions, liées par exemple à des exigences architecturales et/ou technico-économiques. Ces contraintes vont en effet figer le niveau de certains facteurs, réduisant ainsi le nombre de paramètres à prendre en compte dans la recherche de solutions, ce qui facilitera la mise en place d'abaques de sélection de solutions pour réduire les besoins de chauffage.

Il est cependant possible de se baser sur des intervalles de solutions pour les facteurs, afin de sélectionner le niveau requis de certains facteurs et de définir ensuite des abaques de sélection de solutions pour les autres facteurs. Ces intervalles seront définis dans la suite de ce chapitre. Les intervalles de solutions et les abaques sont déterminés à l'aide des modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage du plan de couplage n°2 (voir chapitre 4, §4.1.4).

Cette étape permet donc de définir les niveaux requis de 6 facteurs, réduisant ainsi le nombre d'inconnues à 5.

Par ailleurs, nous soulignons que le choix des caractéristiques de l'enveloppe pour réduire les besoins de chauffage, influence également les besoins de rafraîchissement. En effet, nous avons montré auparavant que si l'on accentue l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, les besoins de rafraîchissement augmenteront (voir chapitre 4, §4.2.3). Il est donc conseillé que ce phénomène soit pris en compte lors du choix des solutions.

- **Etape 2 :** Cette étape consiste à sélectionner la configuration requise des facteurs qui influencent les besoins de rafraîchissement, tout en tenant compte des niveaux des facteurs retenus dans la première étape.

L'analyse de sensibilité pour les besoins de rafraîchissement effectuée dans le chapitre 4 (voir chapitre 4, §4.2.3) a montré que les facteurs qui ont le plus d'impact sur ces besoins sont *Surventil*, *Inertie*, *Masques*, *FS*, *Uw* et %vitrage.

Les niveaux des facteurs *Uw*, *FS* et %vitrage ont été sélectionnés dans la première étape. Il reste donc trois facteurs à faire varier pour la réduction des besoins de rafraîchissement, à savoir *Surventil*, *Inertie* et *Masques*. Rappelons que l'inertie thermique a un effet réduit sur les besoins de chauffage.

Le choix de niveaux de ces trois facteurs est effectué à l'aide d'abaques exprimant les besoins de rafraîchissement en fonction de leurs niveaux respectifs. Les trois solutions pour le rafraîchissement du bâtiment décrites précédemment sont analysées dans cette étape. Le niveau du facteur EER_g nécessaire pour la première solution est déterminé dans la troisième étape.

Les abaques sont déterminés à l'aide des modèles polynômiaux pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement du plan de couplage n°2 (voir chapitre 4, §4.1.5). La consommation des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne est également déterminée à l'aide des modèles polynômiaux du plan de couplage n°2 (voir chapitre 4, §4.1.8).

- **Etape 3 :** Il s'agit de la dernière étape qui consiste à déterminer les niveaux adéquats des facteurs COP_g et EER_g permettant de respecter pour chaque climat, la limite imposée en consommation d'énergie finale annuelle. Le choix de ces niveaux sera également effectué à l'aide d'abaques.

Il est à noter que ce choix de solutions ne prend en compte que le critère énergétique. Nous allons voir par la suite, qu'il existe de nombreuses solutions permettant d'atteindre nos objectifs. Il est donc conseillé qu'une étude technico-économique et de cycle de vie soit associées à ce type de travail, permettant ainsi d'affiner le choix de solutions et d'effectuer éventuellement la sélection finale. Ce type d'étude ne faisant pas partie de ce travail, nous allons sélectionner de manière un peu arbitraire plusieurs solutions.

Enfin, nous précisons que les valeurs des performances énergétiques déterminées à l'aide des modèles polynômiaux ont toutes été vérifiées par la simulation numérique. Ainsi, pour chaque solution, nous donnons simultanément les performances énergétiques obtenues par les modèles polynômiaux et celles obtenues par simulation numérique.

5.3 Définition des intervalles de solutions pour les facteurs

L'analyse de solutions performantes réalisée au chapitre 4 à l'aide des fréquences cumulées (voir chapitre 4, §4.3), nous permet de définir des intervalles de solutions pour chaque facteur dans le but de concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie. Ces intervalles vont, bien entendu, dépendre des performances énergétiques visées.

Les intervalles sont déterminés à partir de la moyenne M et l'écart type σ de la distribution des niveaux des facteurs.

La moyenne M et l'écart type σ du facteur x_i sont définis comme suit :

$$\begin{cases} M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - M)^2} \end{cases} \quad (5.1)$$

Où n est le nombre de points considérés et X_i le niveau du facteur x_i en variable centrée réduite.

Considérons à titre d'exemple le facteur Uw pour le cas où l'on recherche des solutions performantes pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement avec une ventilation double flux (voir chapitre 4, §4.3.2). La Figure 5.1 montre les fréquences cumulées et la fonction de répartition pour le facteur Uw . Les fréquences cumulées montrent que ce facteur est majoritairement compris entre 0,77 et 2,1 W/m²K. Ceci peut également être mis en évidence à l'aide de sa fonction de répartition. Cette fonction montre effectivement en évidence que ce facteur est majoritairement compris entre 0,77 à 2,1 W/m²K. La majorité de ces valeurs font partie de l'intervalle $[M - \sigma, M + \sigma]$ que nous allons considérer comme étant l'intervalle de solutions pour chaque facteur.

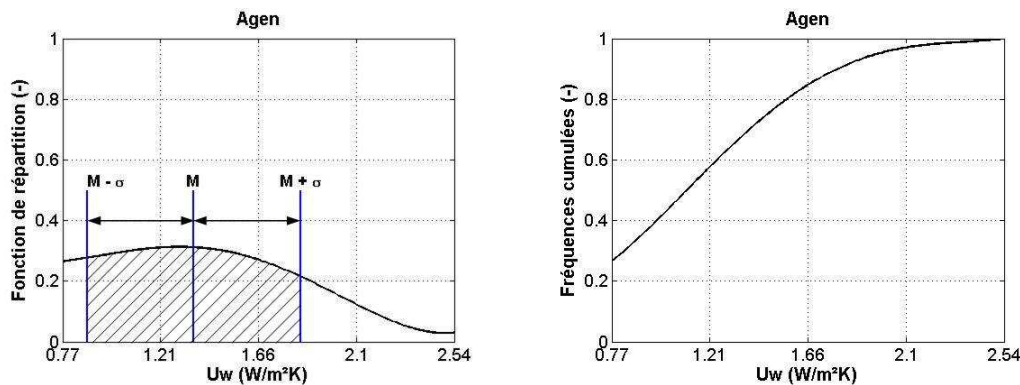


Figure 5.1 : Fonction de répartition et fréquence cumulée pour le facteur Uw à Agen

Ces intervalles seront utilisés pour sélectionner les niveaux de certains facteurs de manière à faciliter la mise en place d'abaques pour le choix des niveaux des autres facteurs.

5.4 Application pour Nancy

5.4.1 Choix de solutions pour les besoins de chauffage

Nous allons nous baser sur les fréquences cumulées calculées pour la recherche de solutions pour les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle (voir chapitre 4, §4.3.3) pour déterminer les intervalles de solutions des facteurs.

De plus, nous allons associer les facteurs Uw et FS . En effet, pour des vitrages non actifs (électro-chromiques, ...), la variation de ces deux variables sont liée. A titre d'exemple, en passant d'un double vitrage standard, à un double vitrage à faible émissivité puis à un triple vitrage à faible émissivité, le facteur Uw diminue ainsi que le facteur FS . Ceci n'est pas le cas d'un vitrage actif dont les caractéristiques optiques peuvent varier indépendamment de ses caractéristiques thermiques, ce type de vitrage ne sera pas pris en compte dans cette étude.

Nous rappelons que chaque niveau des facteurs Uw et FS représente un type de vitrage (voir chapitre 3, Tableau 3.18). Le niveau (-1) de ces deux facteurs est un triple vitrage avec deux couches à faible émissivité rempli de krypton. Le niveau (0) est un double vitrage à faible émissivité rempli d'air avec une couche à faible émissivité, et le niveau (+1) représente un double vitrage standard rempli d'air (WINDOW5.1, 2005).

La Figure 5.2 montre les intervalles de solutions des facteurs pour Nancy, il est obligatoire d'utiliser une ventilation double flux pour atteindre des besoins de chauffage inférieurs ou égaux à 15 kWh/m².an (voir chapitre 4, §4.3.3). Nous donnons également à titre indicatif, les intervalles de solutions des facteurs qui ne concernent pas les besoins de chauffage (*Surventil*, *Masques*, *COP* et *EER*).

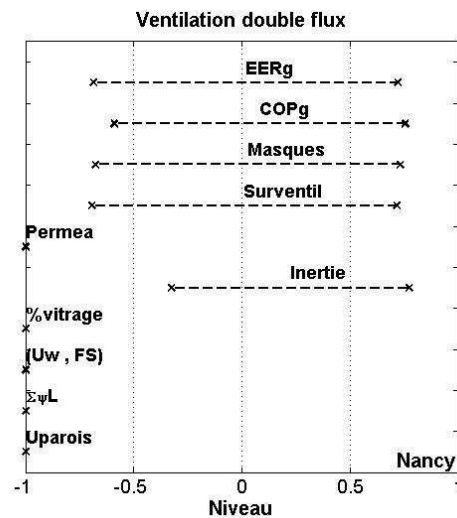


Figure 5.2 : Intervalles de solutions des facteurs pour Nancy

Il apparaît que les facteurs concernant les besoins de chauffage sont au niveau bas (-1), à part le facteur *Inertie* qui varie entre le niveau (-0,3) et le niveau (+0,8). Au vu de ces données, nous retenons le niveau (0) pour le facteur *Inertie* et le niveau (-1) pour les autres facteurs (voir Tableau 5.2). Les besoins de chauffage pour cette configuration de facteurs est de 13,82 kWh/m².an.

Facteurs	Solution		Unité
	Niveau	Valeur	
U _{parois}	(-1)	0,10	W/m ² K
ΣψL	(-1)	2,04	W/K
U _w	(-1)	0,77	-
FS	(-1)	0,49	-
%vitrage	(-1)	50	%
Inertie	(0)	Moyenne	-
Ori	(-1)	Nord/Sud	-
Permea	(-1)	0,11	vol/h sous 4 Pa
Al _{eclairage}	(-1)	6	W/m ²
Système de ventilation mécanique			
Double flux	Oui		

Tableau 5.2: Solution pour atteindre des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an à Nancy

Le Tableau 5.3 donne les valeurs des besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle pour les auxiliaires de la ventilation double flux, obtenus par les modèles polynômiaux et par la simulation numérique.

L'efficacité du récupérateur de chaleur de la ventilation double flux est égale à 80 %. Nous rappelons que les besoins de chauffage du bâtiment pour la configuration de référence est de 84,31 kWh/m².an.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux (kWh/m ² .an)	Simulation numérique (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,34	13,82
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	5,47

Tableau 5.3 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nancy

5.4.2 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement

Il s'agit de sélectionner les niveaux adéquats des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques* pour le rafraîchissement du bâtiment tout en tenant compte des niveaux des facteurs que nous avons sélectionnés pour obtenir des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an.

La Figure 5.3 donne les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne du bâtiment (voir Tableau 5.2) en fonctions des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques*.

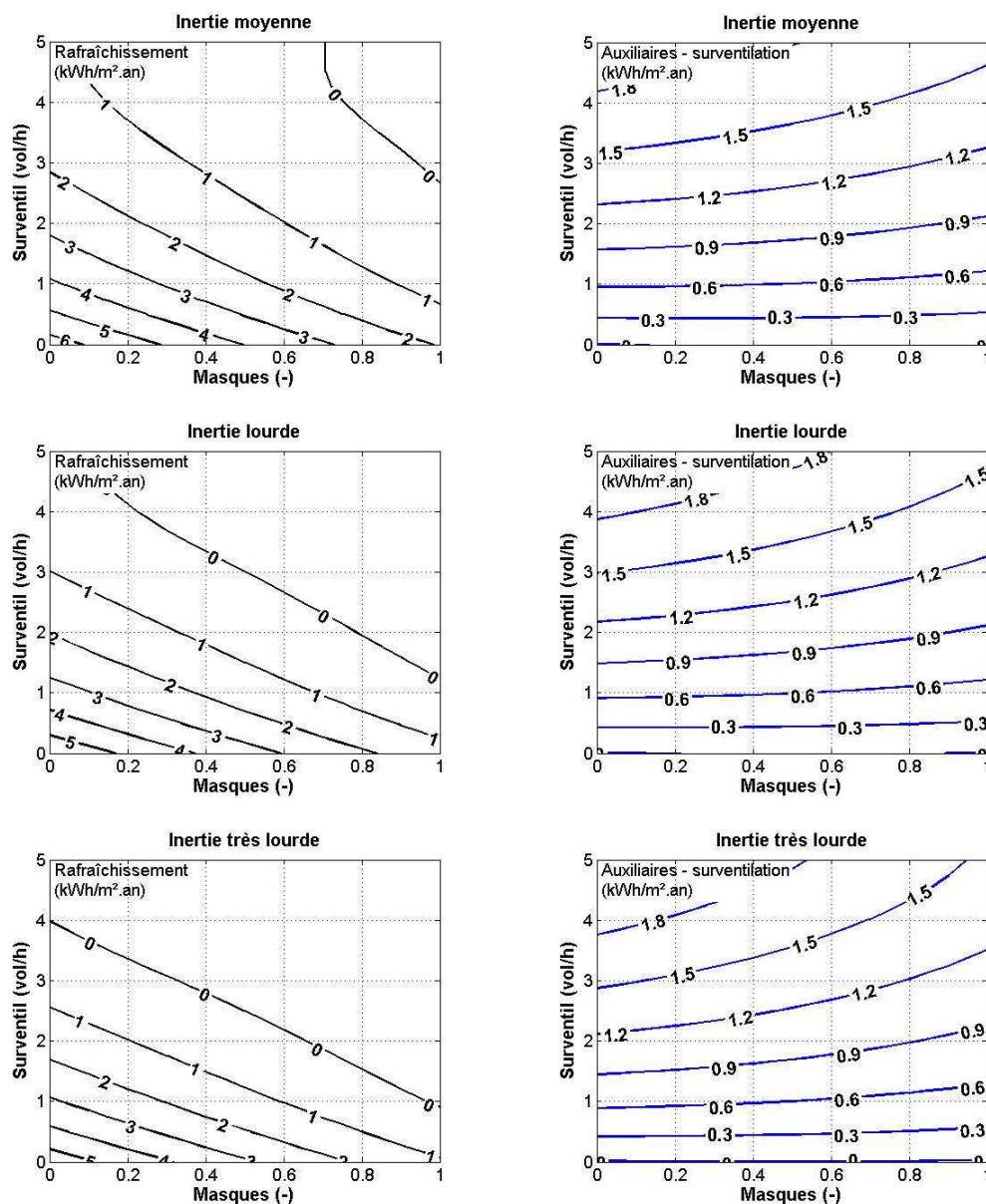


Figure 5.3 : Besoins de rafraîchissement et consommation des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne en fonction des facteurs Inertie, Surventil et Masques pour Nancy

Nous rappelons que les besoins de rafraîchissement du bâtiment pour la configuration de référence sont de 5,92 kWh/m².an.

Cas 1 : La première solution consiste à concevoir l'enveloppe du bâtiment de manière à réduire les besoins de rafraîchissement et de couvrir le solde des besoins en utilisant un système actif caractérisé par son efficacité globale EER_g .

Considérons, par exemple, la configuration suivante : *Inertie moyenne*, *Masques* = 0,5 et *Surventil* = 0 vol/h. Les abaques indiquent des besoins de rafraîchissement égaux à 4,0 kWh/m².an.

Le Tableau 5.4 donne pour la solution proposée, les besoins de chauffage, les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie finale annuelle pour les auxiliaires de la ventilation mécanique, obtenus par les modèles polynômiaux et par la simulation numérique.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1 (kWh/m ² .an)	Cas 1 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,34	13,82
Besoins de rafraîchissement	4,0	4,8
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	5,47

Tableau 5.4 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nancy

Cas 2 : La deuxième solution consiste à rafraîchir le bâtiment grâce à une surventilation mécanique nocturne.

Pour la configuration : *Inertie lourde*, *Masques* = 0,5 et *Surventil* = 3 vol/h, les besoins de rafraîchissement sont nuls et la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne est égale à 1,35 kWh/m².an.

Le Tableau 5.5 donne pour la configuration proposée, les besoins de chauffage, les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie annuelle pour les auxiliaires des systèmes de ventilation mécanique.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 2 (kWh/m ² .an)	Cas 2 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,67	13,94
Besoins de rafraîchissement	0,0	0,0
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	5,47
Auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne	1,35	1,27

Tableau 5.5 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nancy

Cas 3 : La troisième solution consiste à rafraîchir le bâtiment avec une surventilation mécanique nocturne, assistée d'un puits climatique. L'utilisation du puits climatique nous permet d'être moins exigeant sur les facteurs *Inertie* et *Surventil* par exemple.

Nous sélectionnons, à titre d'exemple, la configuration suivante : *Inertie moyenne*, *Masques* = 1 et *Surventil* = 1,25 vol/h. Les abaques donnent des besoins de rafraîchissement de 0,6 kWh/m².an et une consommation d'énergie pour les auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne égale à 0,6 kWh/m².an

Il s'agit maintenant de dimensionner le puits climatique de manière à couvrir le solde des besoins de rafraîchissement. Un puits climatique peut être caractérisé par trois grandeurs, à savoir le débit d'air total traversant les tubes enterrés, la profondeur d'enterrement des tubes

et l'efficacité de l'installation. L'efficacité de l'installation peut être calculée à l'aide de l'équation (5.2), issue du modèle stationnaire continu développé dans le chapitre 2 :

$$\varepsilon = 1 - e^{\frac{-U_g \cdot L}{m_a \cdot C_p}} \quad (5.2)$$

Cette équation montre que l'efficacité d'une installation de puits climatique dépend de la longueur des tubes enterrés L , du débit d'air traversant chaque tube m_a et du coefficient d'échange global U_g entre l'air et la température non perturbée du sol qui à son tour dépend du diamètre des tubes et des caractéristiques thermo-physiques des tubes et du sol. Une efficacité de 1 signifie que la température de l'air à la sortie du puits climatique est égale à la température du sol non perturbé.

Il s'agit donc d'identifier des valeurs requis pour ces trois paramètres permettant d'assurer le rafraîchissement du bâtiment et ceci, rappelons le, en complément du débit d'air de la surventilation mécanique nocturne qui est égal à 1,25 vol/h. En identifiant les valeurs adéquates pour le débit et l'efficacité, l'équation (5.2) permet de déterminer les caractéristiques géométriques du puits climatique à savoir, le nombre, la longueur et le diamètre des tubes enterrés.

Le puits climatique fonctionne uniquement en période d'été si la température extérieure est supérieure à 18°C. Il est mis en marche en période d'occupation et arrêté en période d'inoccupation où c'est la surventilation mécanique nocturne qui fonctionne.

Nous avons effectué plusieurs simulations numériques pour le couplage bâtiment, puits climatique et surventilation mécanique nocturne pour la période d'été, en faisant varier les trois facteurs considérés sur trois niveaux (voir Tableau 5.6). Le modèle de puits climatique utilisé pour les simulations est le modèle stationnaire continu (voir chapitre 2). La valeur de 1095 m³/h dans le Tableau 5.6 correspond au débit d'air hygiénique (ADEME, 1993).

Facteur	Niveau (-1)	Niveau (0)	Niveau (+1)	Unité
Efficacité	0,80	0,85	0,90	-
Débit d'air	1095	1,5x1095	2x1095	m ³ /h
Profondeur des tubes enterrés	1,5	2,0	2,5	m

Tableau 5.6 : Facteurs pris en compte pour évaluer le potentiel de rafraîchissement d'un puits climatique

Pour les trois niveaux des facteurs, nous avons effectué 27 simulations numériques (3³) sans avoir recours aux plans d'expériences. Les simulations numériques effectuées montrent qu'une efficacité de 0,85, un débit d'air de 1095 m³/h et une profondeur de 1,5 m permettent de couvrir le solde des besoins de rafraîchissement du bâtiment. Il reste donc à déterminer les caractéristiques géométriques de l'installation et les caractéristiques thermo-physiques des tubes et du sol permettant d'obtenir une efficacité de 0,85.

Le choix des caractéristiques géométriques du puits climatique dépend de l'espace disponible autour du bâtiment et les caractéristiques thermo-physiques du sol dépendent de la nature du sol. Quant au type de tubes enterrés, le matériau couramment utilisé est du polyéthylène à cause de son étanchéité et de sa facilité de mise en œuvre et également pour des raisons d'ordre sanitaire.

La Figure 5.4 montre sous forme d'abaques, l'efficacité du puits climatique en fonction de la longueur, du nombre et du diamètre des tubes enterrés. Le débit d'air total est de 1095 m³/h, également repartie entre les tubes, la profondeur d'enfouissement est de 1,5 m et le sol est argileux. Ces abaques ont été déterminés à l'aide de l'équation (5.2).

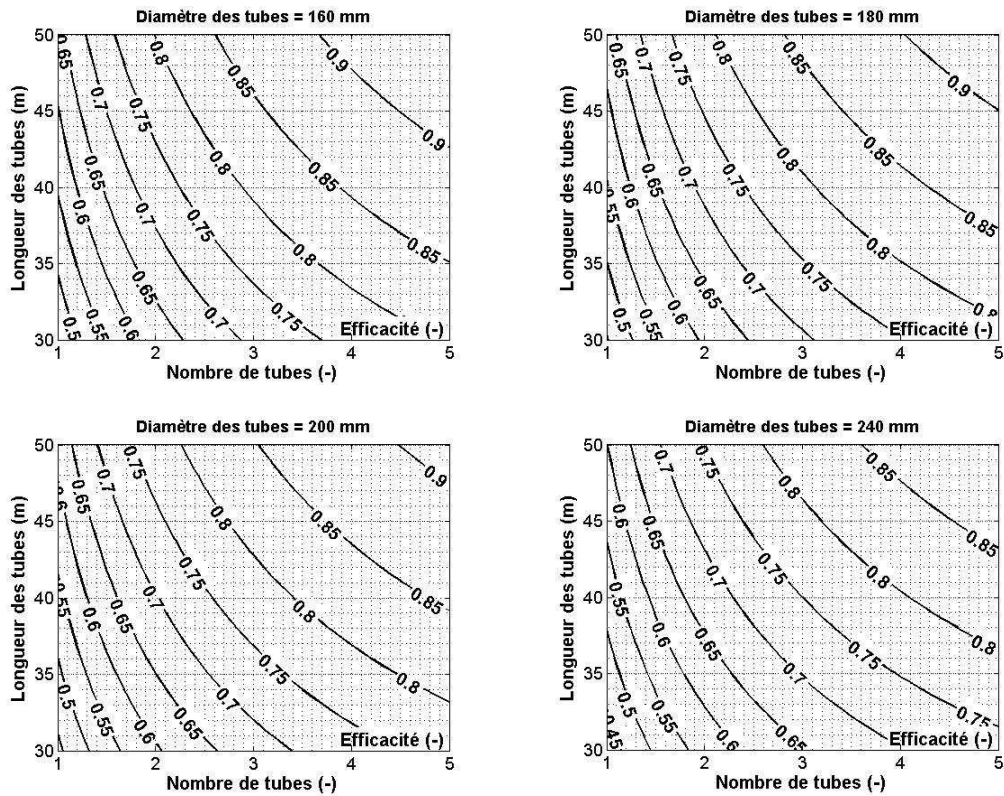


Figure 5.4 : Efficacité du puits climatique en fonction du nombre, de la longueur et du diamètre des tubes pour Nancy

Les abaques montrent qu'il est possible d'obtenir une efficacité de 0,85 pour de nombreuses configurations géométriques. Ainsi, en fonction de l'espace disponible ou d'autres contraintes, on peut choisir soit « 3 tubes de 47 m de longueur chacun et de 160 mm de diamètre », soit « 4 tubes de 44 m de longueur chacun et de 200 mm de diamètre », ou encore d'autres configurations.

Les pertes de charge linéaires dans un tube sont déterminées comme suit:

$$\Delta p = \xi \times \frac{L}{D} \times \rho \times \frac{V_{air}^2}{2} \quad (5.3)$$

A partir de cette équation, nous avons déterminé des abaques pour les pertes de charge dans chaque tube, supposé rectiligne, en fonction du nombre, de la longueur et du diamètre des tubes (voir Figure 5.5).

Ces abaques associés aux abaques de la Figure 5.3 permettent de choisir la configuration géométrique adéquate pour le puits climatique tout en limitant les pertes de charge et donc les consommations d'énergie des auxiliaires de la ventilation. On peut constater, par exemple, que les pertes de charge par tube pour la configuration « 3 tubes de 45 m de longueur et de 160 mm de diamètre » sont de 92 Pa, tandis que celles pour la configuration « 4 tubes de 44 m de longueur et de 200 mm de diamètre » sont de 17 Pa, soit 81,5% de pertes de charge en moins.

La simulation numérique montre que la valeur de la consommation des auxiliaires de la ventilation du puits climatique pour la configuration « 4 tubes de 44 m de longueur et de 200 mm de diamètre » est de 0,3 kWh/m².an, alors que celle de la ventilation double flux est de 5,47 kWh/m².an, et celle de la surventilation nocturne est 0,53 kWh/m².an.

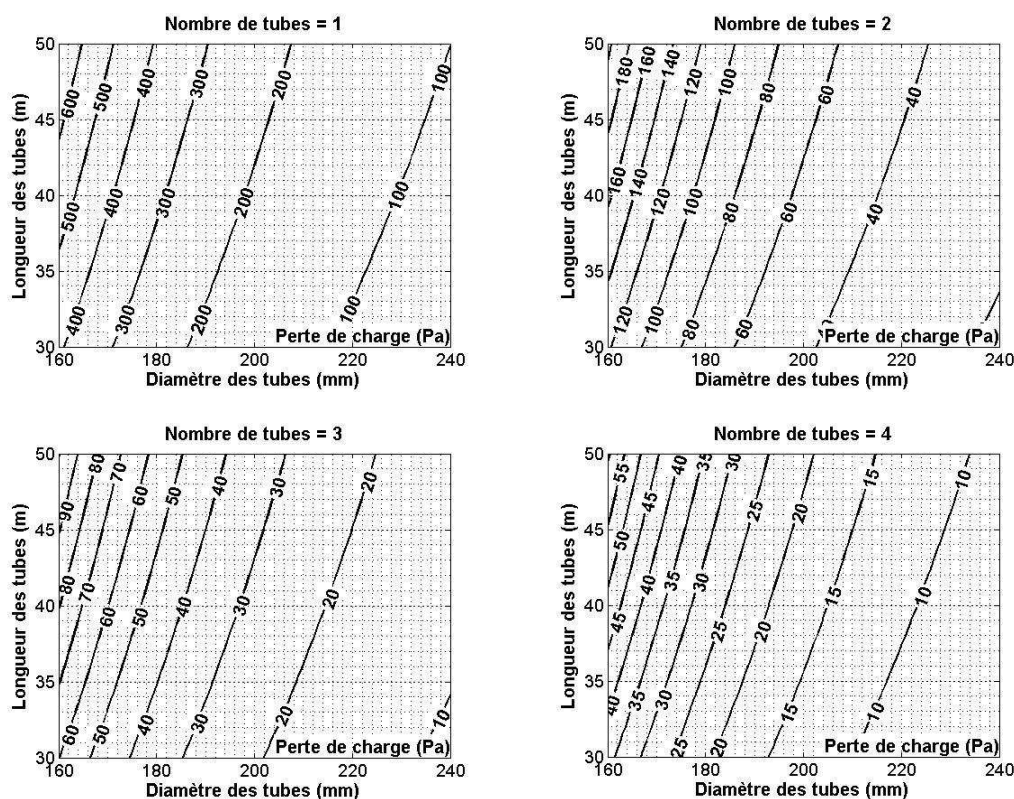


Figure 5.5 : Pertes de charge linéaires dans un tube rectiligne en fonction du nombre, de la longueur et du diamètre des tubes

Le Tableau 5.7 donne pour le bâtiment basse consommation, les besoins de chauffage, les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie finale annuelle pour les auxiliaires de ventilation mécanique qui inclut la ventilation double flux, la surventilation nocturne et le puits climatique.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 3 (kWh/m ² .an)	Cas 3 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,34	13,82
Besoins de rafraîchissement	-	0,00
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	5,47
Auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne	0,60	0,53
Auxiliaires du puits climatique	-	0,30

Tableau 5.7 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nancy

5.4.3 Choix des performances des systèmes de chauffage et de rafraîchissement

Nous avons sélectionné les niveaux de 11 facteurs parmi les 13 facteurs considérés pour l'évaluation des performances énergétique du bâtiment. Les deux facteurs dont le niveau reste à sélectionner sont le coefficient de performance global du système de chauffage COP_g et l'efficacité globale du système de rafraîchissement EER_g .

Comme précédemment, nous allons définir des abaques mettant en relation ces deux facteurs avec la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment pour les solutions retenues précédemment. Ces abaques vont nous permettre de sélectionner les niveaux adéquats des facteurs COP_g et EER_g pour atteindre une consommation d'énergie finale annuelle inférieure ou égale à 46,51 kWh/m².an.

Ces abaques peuvent être déterminés à l'aide du modèle polynômial pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle du plan d'expériences de couplage (voir chapitre 4, §4.1.6), tout en tenant compte des niveaux des facteurs fixés lors du choix de solution pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement. Néanmoins, il n'est pas possible d'utiliser ce modèle pour déterminer l'abaque du bâtiment basse consommation du cas de rafraîchissement n°3. En effet, pour ce cas, le bâtiment est couplé à un puits climatique ce que le modèle polynômial ne peut pas prendre en compte. Par contre, il est possible de déterminer cet abaque à l'aide de l'équation suivante :

$$C_F = f(COP_g, EER_g) = \frac{B_{\text{chauffage}}}{COP_g} + \frac{B_{\text{rafraichissement}}}{EER_g} + C_{VMC} + C_{\text{usages}} \quad (5.4)$$

Avec :

C_F	consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment basse consommation, (kWh/m ² .an)
$B_{\text{chauffage}}$	besoins de chauffage du bâtiment basse consommation, (kWh/m ² .an)
$B_{\text{rafraichissement}}$	besoins de rafraîchissement du bâtiment basse consommation, (kWh/m ² .an)
C_{VMC}	consommation de la ventilation mécanique du bâtiment basse consommation (ventilation double flux, surventilation mécanique nocturne et puits climatique), (kWh/m ² .an)
C_{usages}	consommation d'énergie des usages du bâtiment basse consommation (éclairage artificiel et bureautique), (kWh/m ² .an)

Les deux inconnues de l'équation (5.4) sont COP_g et EER_g . Comme on peut le constater, cette équation peut également servir à déterminer les abaques des cas 1 et 2.

Nous avons deux possibilités, soit utiliser le modèle polynômial de la consommation d'énergie finale annuelle développé pour déterminer les abaques des cas 1 et 2, et l'équation (5.4) pour déterminer le cas 3, soit utiliser l'équation (5.4) pour déterminer les abaques des trois cas basse consommation.

Etant donné que les besoins de chauffage, les besoins de rafraîchissement et les consommations des usages et des auxiliaires de la ventilation mécanique sont soit vérifiés soit déterminés directement par la simulation numérique, l'équation (5.4) offre des résultats identiques à la simulation numérique. Ainsi, et dans le but d'obtenir une meilleure précision, nous avons opté pour le deuxième choix.

La Figure 5.6 donne les résultats obtenus pour les trois cas de solutions à basse consommation. La consommation totale des autres usages est de 22,8 kWh/m².an, cette valeur sera identique pour Agen et Nice. Pour les cas 2 et 3, les besoins de rafraîchissement sont nuls, ceci se traduit par des courbes parallèles à l'axe EER_g .

Les abaques montrent qu'il est possible d'atteindre des consommations d'énergie finale annuelle inférieures à 46,51 kWh/m².an, avec des facteurs COP_g et EER_g proches de 1. Il est à noter que ceci a déjà été mis en évidence au chapitre 4 lors de l'analyse de solutions performantes pour les besoins de chauffage et la consommation d'énergie finale annuelle.

Nous rappelons que pour la configuration de référence, le facteur de performance global du système de chauffage COP_g est de 1,94 et que l'efficacité globale du système de rafraîchissement EER_g est de 1,07 (voir chapitre 3, §3.1.7.6). Nous allons donc retenir ces performances pour les trois configurations basse consommation.

Le Tableau 5.8 montre les valeurs retenues des facteurs COP_g et EER_g et la consommation d'énergie finale annuelle des trois cas de configurations basse consommation.

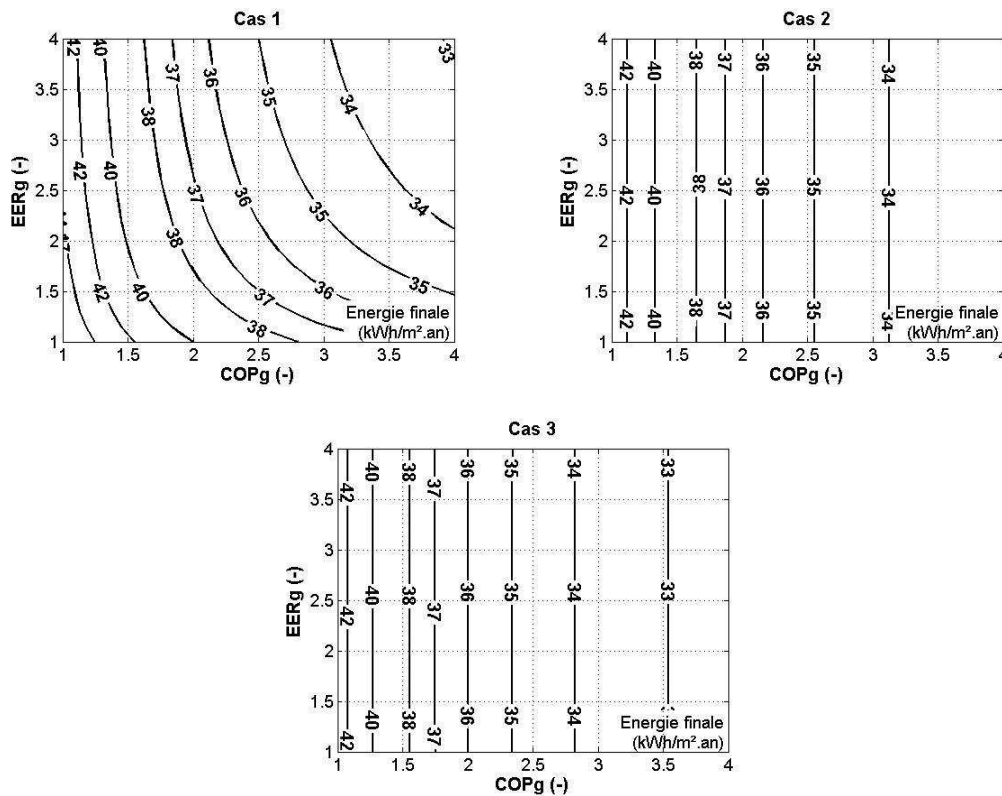


Figure 5.6 : Consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g pour Nancy

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Unité
COP_g	1,94	1,94	1,94	-
EER_g	1,07	-	-	-
Consommation d'énergie finale annuelle	39,88	36,73	36,22	kWh/m².an

Tableau 5.8 : Facteurs COP_g et EER_g et consommation d'énergie finale annuelle pour Nancy

Il est à souligner que pour une pompe à chaleur, le choix du coefficient de performance (COP) ne peut pas s'effectuer de manière indépendante de l'efficacité (EER). En effet, ces deux facteurs sont corrélés vu qu'il s'agit de la même machine. Il est ainsi nécessaire, de tenir compte de cette corrélation lors du choix des niveaux requis pour les performances d'une pompe à chaleur.

5.4.4 Comparaison avec la configuration de référence

Il s'agit de comparer les trois configurations sélectionnées précédemment avec la configuration de référence en termes de performances énergétique et d'émission de CO_2 .

Le Tableau 5.9 donne les caractéristiques du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation.

La Figure 5.7 montre les besoins de chauffage, les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie finale annuelle pour l'éclairage, les équipements de bureautique et la ventilation mécanique du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation. La consommation d'énergie de la ventilation mécanique inclut la ventilation double flux, la surventilation mécanique nocturne et le puits climatique.

On peut constater que les besoins de chauffage sont réduits de 83,6 %, les besoins de rafraîchissement de 19 % pour le cas 1 et de 100 % pour les cas 2 et 3. En revanche, on constate une augmentation des consommations d'énergie pour les systèmes de ventilation mécanique due à l'utilisation de la ventilation double flux, de la surventilation mécanique nocturne et du puits climatique.

Facteurs	Cas de référence	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Unité
U_{parois}	0,19	0,10	0,10	0,10	W/m ² K
$\Sigma \Psi_L$	86,02	2,04	2,04	2,04	W/K
U_w	2,54	0,77	0,77	0,77	-
FS	0,77	0,49	0,49	0,49	-
%vitrage	50	50	50	50	%
Inertie	Moyenne	Moyenne	Lourde	Moyenne	-
Ori	N/S	N/S	N/S	N/S	-
Permea	0,72	0,11	0,11	0,11	vol/h sous 4 Pa
$A_{\text{éclairage}}$	11	6	6	6	W/m ²
Surventil	0	0	3	1,25	vol/h
Masques	0	0,5	0,5	1	-
COP_g	1,94	1,94	1,94	1,94	
EER_g	1,07	1,07	-	-	-
Systèmes de ventilation mécanique					
Double flux	Non	Oui	Oui	Oui	
Puits climatique	Non	Non	Non	Oui	

Tableau 5.9 : Caractéristiques de la configuration de référence et des configurations basse consommation pour Nancy

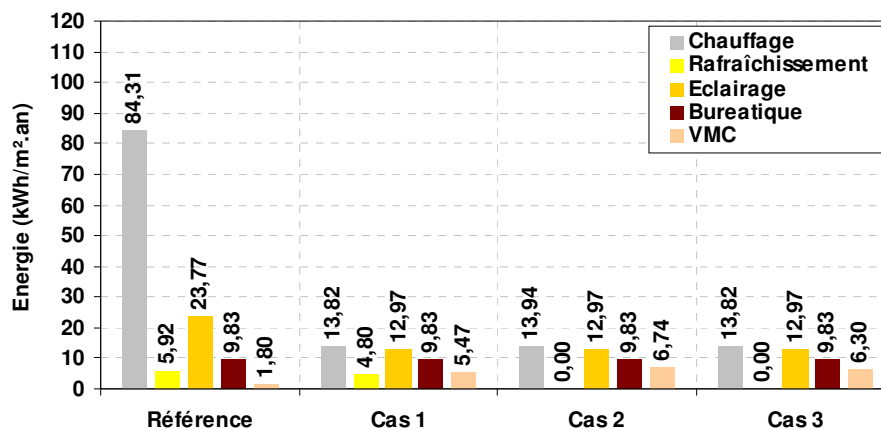


Figure 5.7 : Besoins et consommations énergétiques du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Nancy

Sur la Figure 5.8, nous avons porté la consommation d'énergie annuelle finale et primaire du bâtiment pour les quatre configurations.

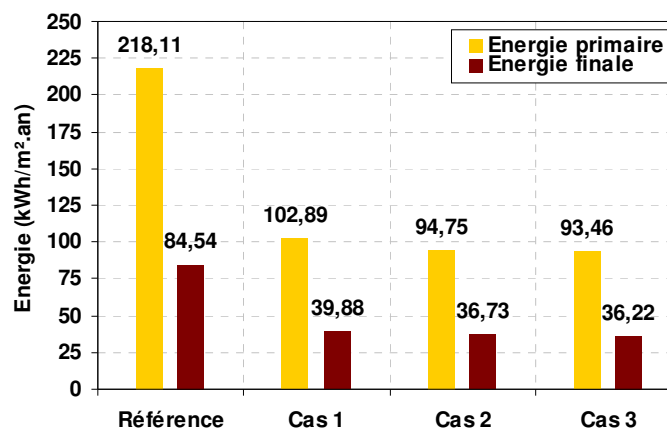


Figure 5.8 : Consommations d'énergie annuelles finale et primaire du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Nancy

La réduction en consommation d'énergie varie, selon les configurations, entre 52,8 % et 57,2 %.

La Figure 5.9 donne l'émission totale de CO₂ du bâtiment pour les quatre configurations. Globalement, la réduction en émission de CO₂ est de l'ordre de 68%. Les émissions de CO₂ ont été calculées à l'aide de la méthode Bilan carbone de l'ADEME (ADEME, 2005b) (voir chapitre 3, §3.1.7.6).

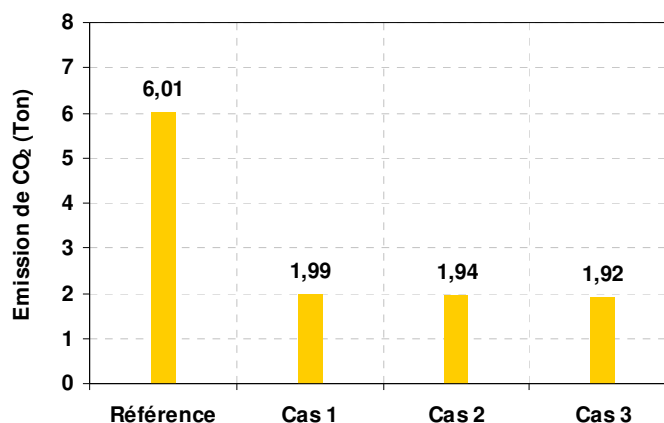


Figure 5.9 : Emission totale de CO₂ du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Nancy

5.4.5 Synthèse et analyse

Nous avons présenté trois exemples de solutions pour Nancy pour concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie respectant les exigences des labels Effinergie et Passivhaus. Il s'agit donc d'intégrer d'autres critères tels que, par exemple, une analyse technico-économique pour effectuer le choix final.

Les résultats obtenus pour Nancy montrent qu'il est possible de respecter les labels Passivhaus et Effinergie en ayant recours systématiquement à une ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait et une attention particulière pour l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe (facteurs U_{parois} , $\sum \psi L$, U_w , %vitrage et $Permea$ sont au niveau (-1)). Ils montrent également que les facteurs COP_g et EER_g proches de 1 s'avèrent suffisants, si la conception de l'enveloppe est soignée. Néanmoins, nous avons retenu les mêmes performances des systèmes que celles de la configuration de référence. Ces résultats sont en cohérence avec l'analyse de solutions performantes effectuée au chapitre 4 (voir chapitre 4, §4.3.3).

Les résultats montrent également qu'il est possible d'annuler les besoins de rafraîchissement et assurer ainsi le confort thermique d'été en utilisant des masques solaires, en soignant l'inertie thermique de l'enveloppe, et en ayant recours à une surventilation mécanique nocturne que l'on peut associer à un puits climatique.

Enfin, on a pu constater que la méthodologie que nous proposons permet d'identifier les solutions de manière simple et efficace. En effet, les modèles polynômiaux développés ont permis de sélectionner rapidement les solutions à adopter pour concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie, grâce à des abaques de sélection de solutions et ceci avec une bonne précision par rapport à la simulation numérique. Tout ceci constitue un atout majeur pour l'utilisation de cette méthodologie.

5.5 Application pour Agen

5.5.1 Choix de solutions pour les besoins de chauffage

Les besoins de chauffage du bâtiment pour la configuration de référence sont égaux à 43,43 kWh/m².an. La Figure 5.10 montre les intervalles de solutions pour les facteurs pour les deux cas ventilation simple flux et ventilation double flux.

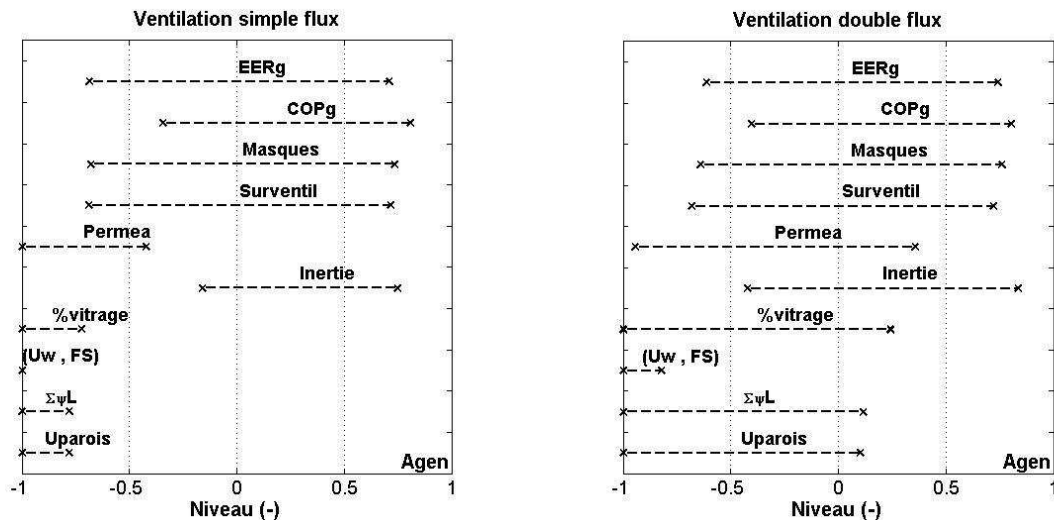


Figure 5.10 : Intervalles de solutions pour Agen

Pour le climat d'Agen, la ventilation double flux n'étant pas une obligation, nous allons nous intéresser aux deux solutions, c'est-à-dire ventilation simple flux et ventilation double flux.

Choix d'une solution avec ventilation simple flux : Pour ce cas, les intervalles montrent que les facteurs Uw et FS au niveau (-1). Ce niveau sera donc retenu pour ces trois facteurs.

Pour le facteur $\%vitrage$ nous avons sélectionné le niveau (-1) qui est la solution la plus rentable d'un point de vue énergétique et économique. Quant au facteur $Inertie$, nous choisissons le niveau (0), sachant que le choix du niveau de ce paramètre influe principalement les besoins de rafraîchissement.

Il reste donc à sélectionner les niveaux des facteurs $\Sigma\psi L$, $Uparois$ et $Permea$ à l'aide d'un d'abaques déterminés à partir du modèle polynômial pour l'évaluation des besoins de chauffage. Nous sélectionnons la configuration : $Uparois = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Sigma\psi L = 2,04 \text{ W/K}$, $Permea = 0,26 \text{ vol/h sous } 4 \text{ Pa}$, dont les besoins de chauffage sont égaux à 14,3 kWh/m².an.

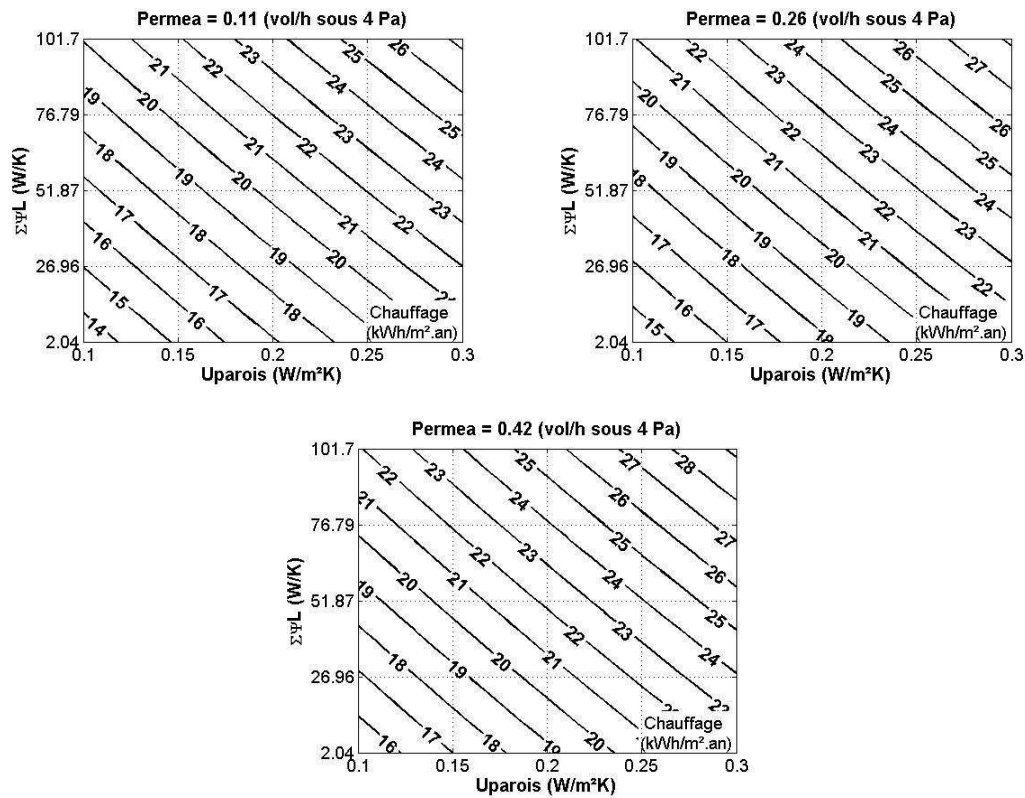


Figure 5.11 : Besoins de chauffage en fonction des facteurs U_{parois} , $\Sigma\psi L$ et Permea avec une ventilation simple flux pour Agen

Choix d'une solution avec ventilation double flux : Avec une ventilation double flux, les facteurs U_w et FS sont inférieurs au niveau (-0,8). Nous choisissons donc pour ces deux facteurs, le niveau (-1).

A l'instar du cas ventilation simple flux, nous retenons pour le facteur $\%vitrage$ le niveau (-1) et pour le facteur $Inertie$ le niveau (0).

La Figure 5.12 donne les besoins de chauffage en fonction des facteurs $\Sigma\psi L$, U_{parois} et $Permea$. On constate qu'il existe de nombreuses configurations permettant d'obtenir des besoins de chauffage inférieurs à $15 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$.

Nous sélectionnons la configuration suivante : $U_{\text{parois}} = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Sigma\psi L = 51,87 \text{ W/K}$, $Permea = 0,57 \text{ vol/h sous 4 Pa}$. Les besoins de chauffage sont alors égaux à $14,89 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$.

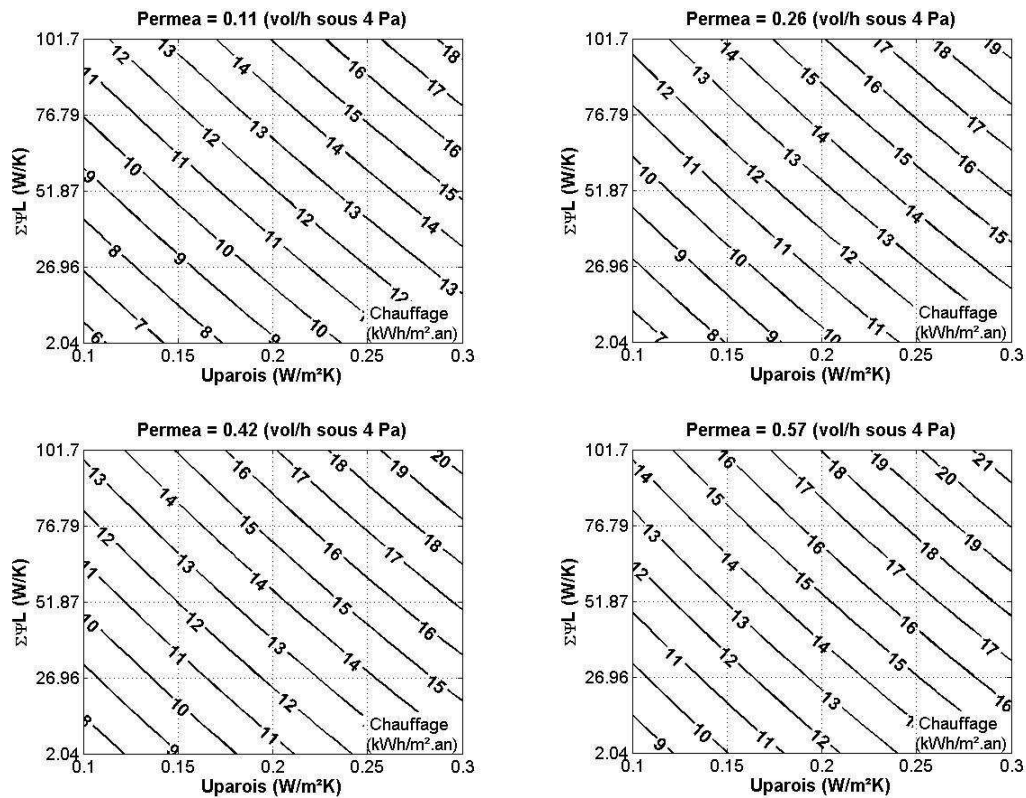


Figure 5.12 : Besoins de chauffage en fonction des facteurs Uparois, $\Sigma\psi L$ et Permea avec ventilation double flux pour Agen

Le Tableau 5.10 donne les caractéristiques des deux solutions retenues.

Facteurs	Cas 1		Cas 2		Unité
	Niveau	Valeur	Niveau	Valeur	
U _{parois}	(-1)	0,10	(0)	0,2	W/m²K
$\Sigma\psi L$	(-1)	2,04	(0)	51,87	W/K
U _w	(-1)	0,77	(-1)	0,77	-
FS	(-1)	0,49	(-1)	0,49	-
%vitrage	(-1)	50	(-1)	50	%
Inertie	(0)	Moyenne	(0)	Moyenne	-
Ori	(-1)	N/S	(-1)	N/S	-
Permea	(-0,5)	0,26	(+0,5)	0,57	vol/h sous 4 Pa
Al _{eclairage}	(-1)	6	(-1)	6	W/m²
Système de ventilation mécanique					
Simple flux	Oui		Non		
Double flux	Non		Oui		

Tableau 5.10 : Caractéristiques des solutions retenues pour Agen

Le Tableau 5.11 résume les résultats obtenus pour les deux solutions retenues.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1 (kWh/m².an)	Cas 1 (kWh/m².an)	Cas 2 (kWh/m².an)	Cas 2 (kWh/m².an)
Besoins de chauffage	14,30	14,64	14,95	14,89
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	1,80	-	5,40

Tableau 5.11 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour les deux solutions retenues pour Agen

5.5.2 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation simple flux

Sur la Figure 5.13 sont portés les besoins de rafraîchissement du bâtiment et la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne en fonction des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques*.

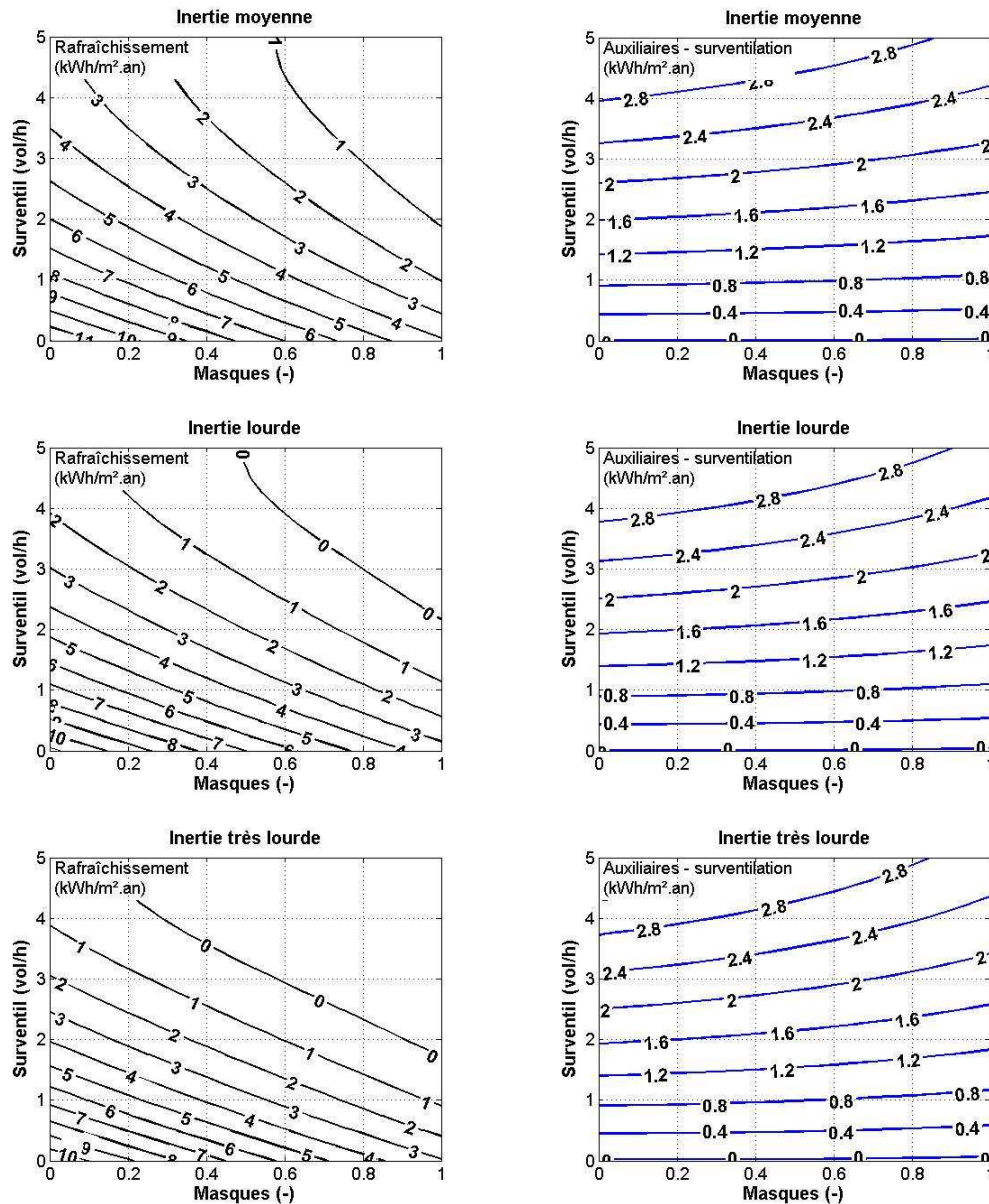


Figure 5.13 : Besoins de rafraîchissement et consommation des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne en fonction des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques* pour le cas ventilation simple pour Agen

Les besoins de rafraîchissement du bâtiment pour la configuration de référence sont de 13,26 kWh/m².an. A l'instar de Nancy, nous allons étudier trois solutions pour le rafraîchissement du bâtiment

Cas 1.1 : Il s'agit de concevoir l'enveloppe du bâtiment de manière à réduire les besoins de rafraîchissement et d'avoir recours à un système actif. Pour la configuration suivante : *Inertie moyenne*, *Masques* = 0,5, *Surventil* = 0 vol/h, les abaques donnent des besoins de rafraîchissement de 7,93 kWh/m².an.

Le Tableau 5.12 donne les besoins de chauffage, de rafraîchissement et la consommation d'énergie pour la ventilation mécanique du bâtiment pour la configuration retenue.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1.1 (kWh/m ² .an)	Cas 1.1 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,30	14,64
Besoins de rafraîchissement	7,75	7,93
Auxiliaires de la ventilation simple flux	-	1,80

Tableau 5.12 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Agen

Cas 1.2 : La configuration : *Inertie lourde*, *Masques* = 0,5, *Surventil* = 5 vol/h, permet d'obtenir des besoins de rafraîchissement nuls.

Les valeurs des besoins et des consommations d'énergie des auxiliaires de la ventilation mécanique sont données dans le Tableau 5.13.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1.2 (kWh/m ² .an)	Cas 1.2 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,90	14,73
Besoins de rafraîchissement	0,00	0,00
Auxiliaires de la ventilation simple flux	-	1,80
Auxiliaires de la surventilation nocturne	3,15	3,25

Tableau 5.13 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Agen

Cas 1.3 : Pour la configuration suivante : *Inertie lourde*, *Masques* = 1, *Surventil* = 1,25 vol/h, les besoins de rafraîchissement sont égaux à 0,9 kWh/m².an et la consommation d'énergie pour les auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne est égale à 0,95 kWh/m².an

Il s'agit maintenant de dimensionner le puits climatique de manière à couvrir le solde des besoins de rafraîchissement.

Le dimensionnement du puits climatique est réalisé à l'aide de la même méthode utilisée pour Nancy. Ainsi, nous avons déterminé qu'une efficacité de 0,85, un débit d'air de 1642,5 m³/h et une profondeur de 2 m permettent de couvrir le solde des besoins de rafraîchissement du bâtiment basse consommation. A partir de ces trois paramètres, nous avons déterminé les abaques de calcul de l'efficacité et des pertes de charge linéaires du puits climatique en fonction du nombre, de la longueur et du diamètre des tubes enterrés.

Les Figure 5.14 et Figure 5.15 donnent les résultats obtenus pour un débit d'air total de 1642,5 m³/h.

Sur la Figure 5.14, il apparaît qu'il est possible d'atteindre une efficacité de 0,85 pour les configurations suivantes : « 4 tubes de 50 m de longueur et 160 mm de diamètre », « 5 tubes de 44 m de longueur et 160 mm de diamètre », « 5 tubes de 46 m de longueur et 180 mm de diamètre » et « 5 tubes de 48 m de longueur et 200 mm de diamètre ».

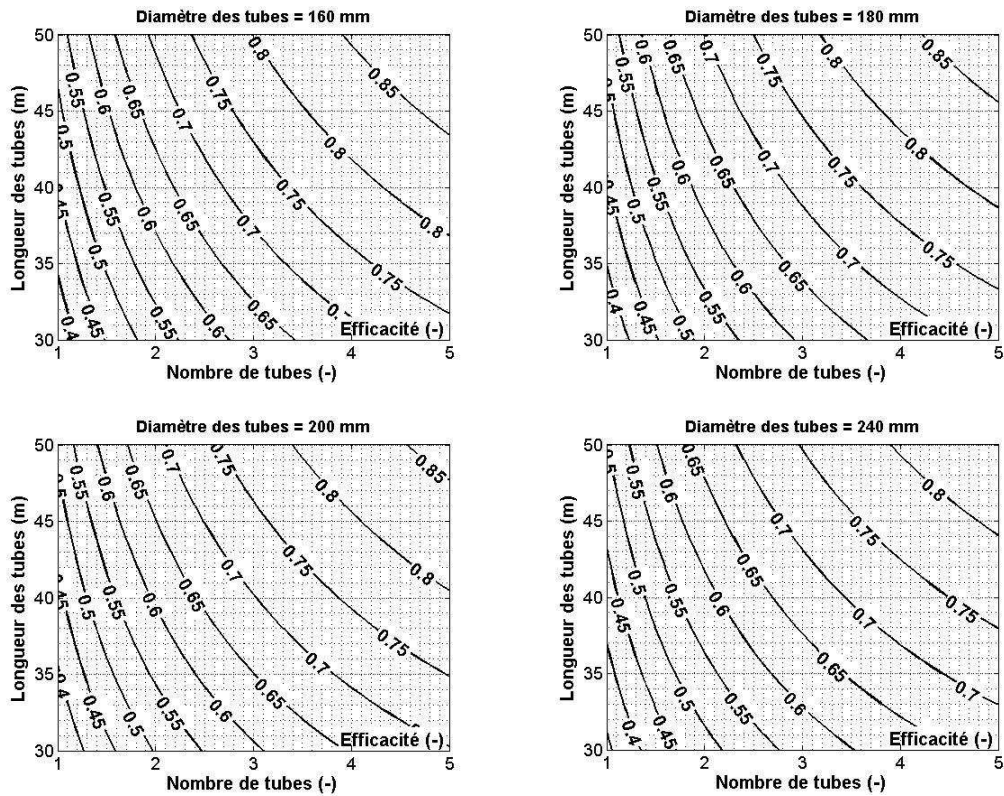


Figure 5.14 : Efficacité de l'installation de puits climatique en fonction du nombre, de la longueur et du diamètre des tubes pour Agen

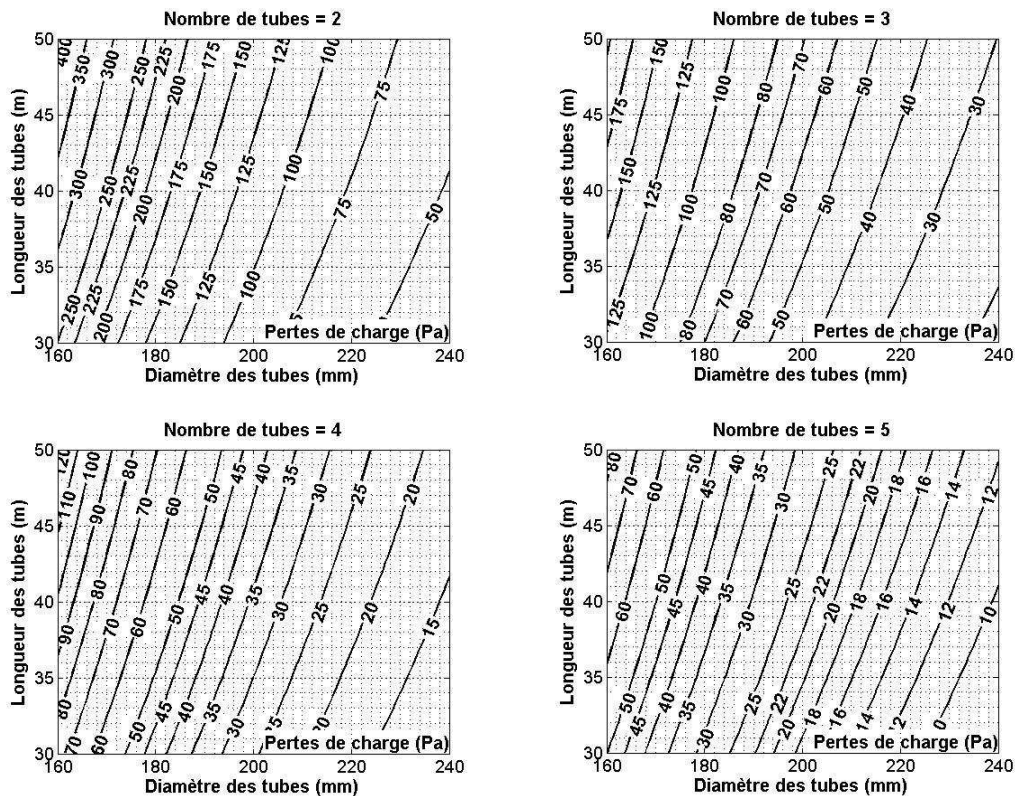


Figure 5.15 : Pertes de charge linéaires dans un tube rectiligne en fonction du nombre, de la longueur et du diamètre des tubes pour Agen

Les abaques de la Figure 5.15 montrent que la configuration « 5 tubes de 48 m de longueur et 200 mm de diamètre » présente le minimum de pertes de charge comparés aux autres

configurations, à savoir 27 Pa. Cette configuration est retenue tout en supposant qu'il existe assez d'espace pour enterrer 5 tubes rectilignes de 48 m de longueur de diamètre 200 mm.

Il est à noter que la distribution de l'air dans le bâtiment dans le cas de l'utilisation d'un puits climatique nécessite un système de ventilation double flux (sans récupération). Le Tableau 5.14 les résultats obtenus pour la solution retenue.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1.3 (kWh/m ² .an)	Cas 1.3 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,90	14,73
Besoins de rafraîchissement	-	0,00
Auxiliaires de la ventilation double flux (sans récupération)	-	5,80
Auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne	0,95	1,00
Auxiliaires du puits climatique	-	0,88

Tableau 5.14 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Agen

5.5.3 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation double flux

Les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne du bâtiment avec ventilation double flux, en fonction des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques* sont donnés sur la Figure 5.16.

Cas 2.1 : Les besoins de rafraîchissement sont égaux à 6,4 kWh/m².an pour la configuration : *Inertie* moyenne, *Masques* = 0,5, *Surventil* = 0 vol/h.

Le Tableau 5.15 donne les besoins et les consommations des auxiliaires de la ventilation pour la solution retenue.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 2.1 (kWh/m ² .an)	Cas 2.1 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,95	14,89
Besoins de rafraîchissement	6,40	6,53
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	5,40

Tableau 5.15 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Agen

Cas 2.2 : Pour la configuration : *Inertie* lourde, *Masques* = 0,5, *Surventil* = 5 vol/h, les besoins de rafraîchissement sont nuls.

Le Tableau 5.16 donne les besoins de chauffage, de rafraîchissement et la consommation d'énergie pour la ventilation mécanique du bâtiment pour la solution proposée.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 2.2 (kWh/m ² .an)	Cas 2.2 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,75	14,89
Besoins de rafraîchissement	0,00	0,00
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	5,40
Auxiliaires de la surventilation nocturne	3,00	2,85

Tableau 5.16 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Agen

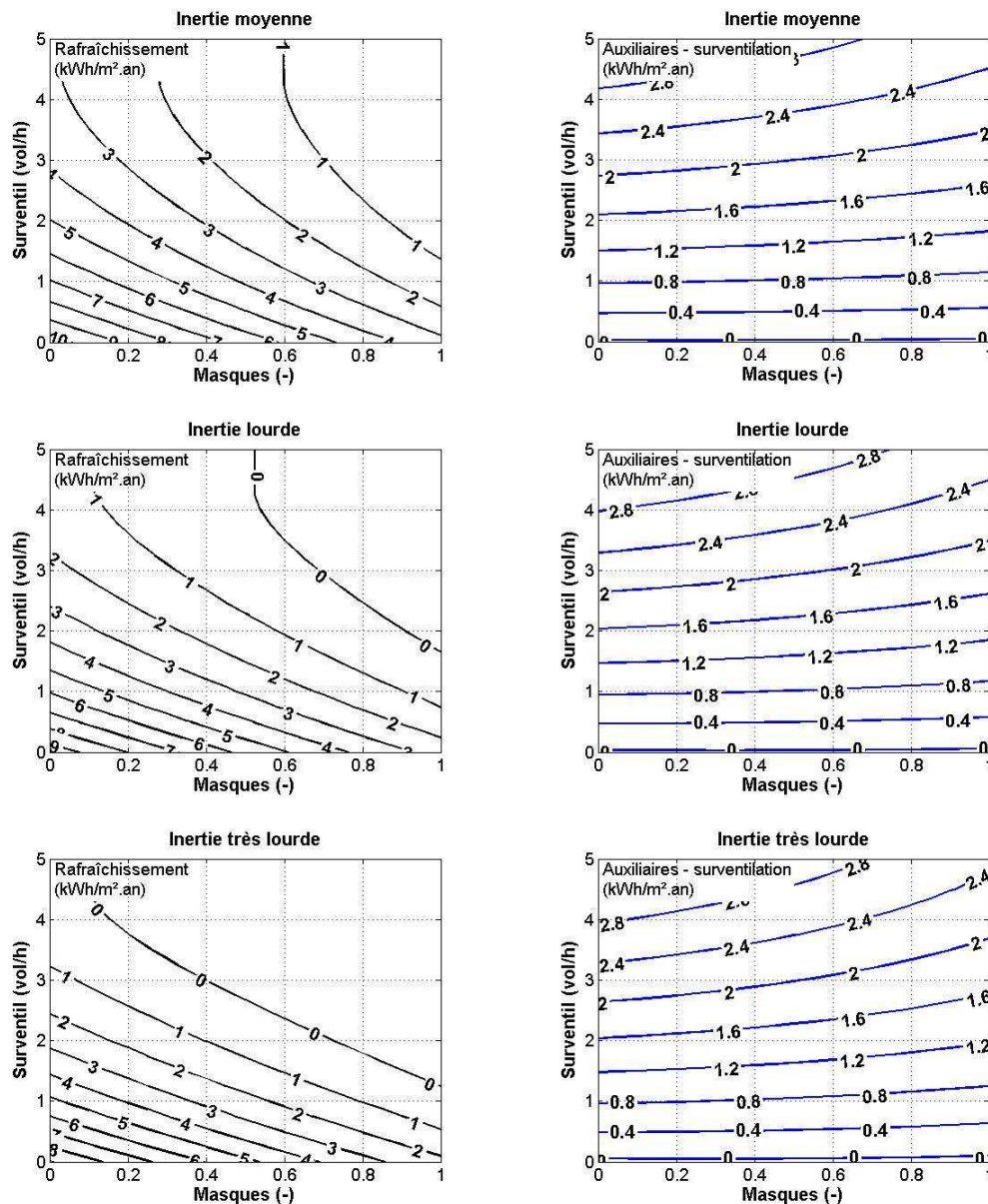


Figure 5.16 : Besoins de rafraîchissement et consommation des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne en fonction des facteurs Inertie, Surventil et Masques pour le cas ventilation double flux pour Agen

Cas 2.3 : Le bâtiment est rafraîchi à l'aide d'une surventilation mécanique nocturne, assistée par un puits climatique. La configuration : *Inertie lourde*, *Masques* = 0,75, *Surventil* = 1,25 vol/h, présente des besoins de rafraîchissement égaux à 1,2 kWh/m².an.

Pour le puits climatique, nous retenons, les mêmes caractéristiques que celles du cas ventilation simple flux, à savoir « 5 tubes de 48 m de longueur et 200 mm de diamètre ». L'efficacité de l'installation est de 0,85, la profondeur d'enterrement est de 2 m et le débit d'air est de 1642,5 m³/h.

Les résultats obtenus en termes de besoins et de consommation des auxiliaires de ventilation sont donnés dans le Tableau 5.17.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 2.3 (kWh/m ² .an)	Cas 2.3 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,90	14,89
Besoins de rafraîchissement	-	0,00
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	6,05
Auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne	0,90	0,95
Auxiliaires du puits climatique	-	0,88

Tableau 5.17 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Agen

5.5.4 Choix des performances des systèmes de chauffage et de rafraîchissement

Nous rappelons que pour le climat d'Agen, le coefficient de performance global du système de chauffage COP_g pour la configuration de référence est de 1,85 et que l'efficacité globale du système de rafraîchissement EER_g est de 1,32 (voir chapitre 3, §3.1.7.6).

Par analogie au climat de Nancy, le choix des facteurs COP_g et EER_g est effectué à partir d'abaques mettant en relation les facteurs COP_g et EER_g avec la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment pour les configurations basse consommation.

Les Figure 5.17 et Figure 5.18 donnent les valeurs des énergies finales en fonction des coefficients COP_g et EER_g .

Il apparaît que les niveaux nécessaires pour ces deux facteurs pour obtenir une consommation d'énergie inférieure ou égale à 39,44 kWh/m².an sont plus importants pour le cas ventilation double flux comparé au cas ventilation simple flux.

Comparons par exemple les abaques du cas1.1 avec celles du cas 2.1. Il s'agit de deux cas dont les niveaux des besoins de chauffage et de rafraîchissement sont très proches. L'utilisation de la ventilation double flux pour le cas 2.1 augmente la consommation d'énergie des auxiliaires, ce qui se traduit par des valeurs pour les facteurs COP_g et EER_g supérieures avec ventilation double flux.

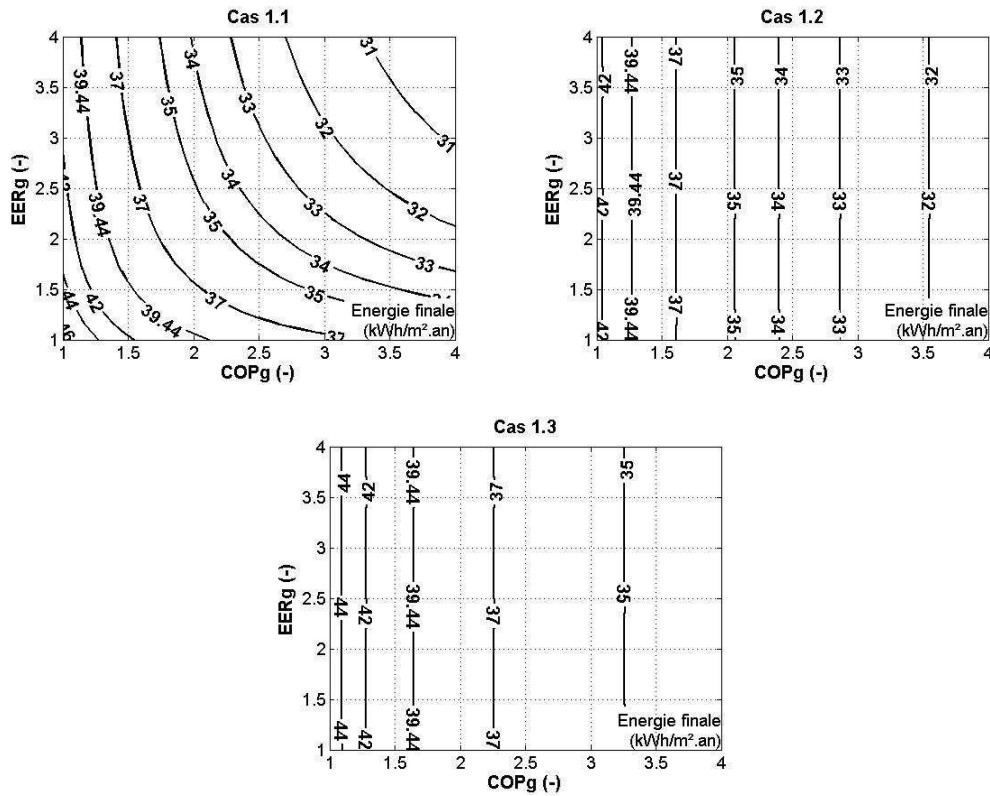


Figure 5.17 : Consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g pour le cas ventilation simple flux pour Agen

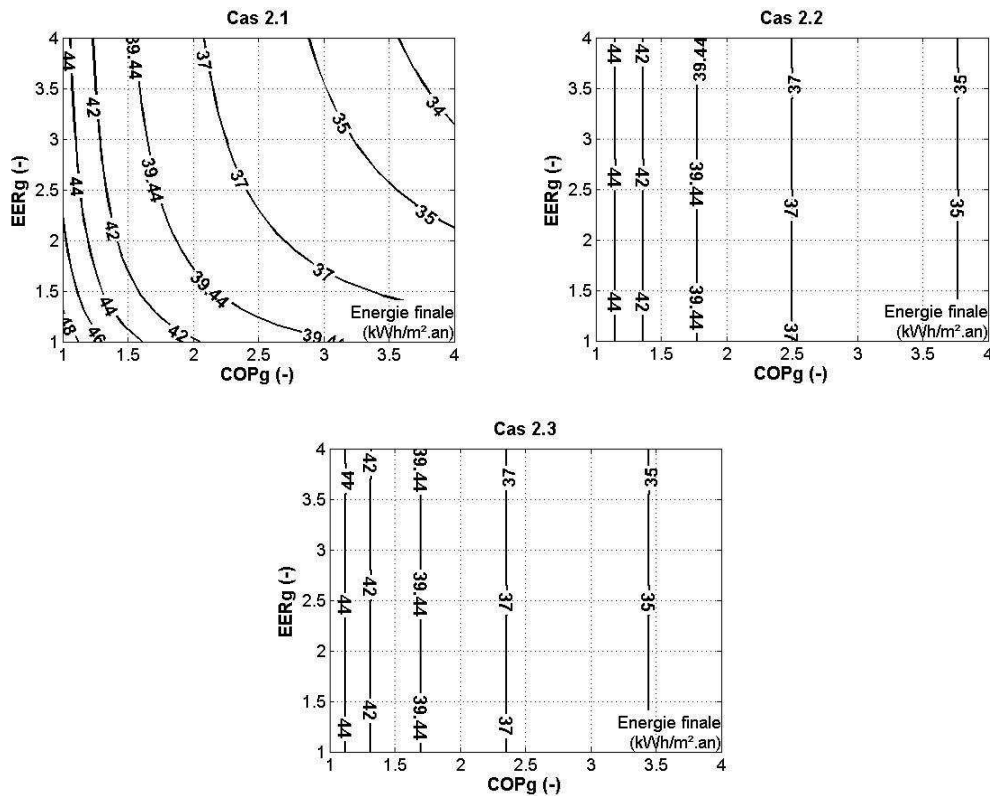


Figure 5.18 : Consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g pour le cas ventilation double flux pour Agen

Le Tableau 5.18 donne les valeurs retenues pour les facteurs COP_g et EER_g ainsi que la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment pour les configurations basse consommation.

Dans le cas où les performances de la configuration de référence ne sont pas suffisantes pour respecter la valeur limite exigée pour la consommation d'énergie finale annuelle, à savoir 39,44 kWh/m².an, les valeurs des facteurs COP_g et EER_g sont sélectionnées de manière à être le plus proches possible de cette valeur limite, en considérant arbitrairement des valeurs identiques pour les deux coefficients

	Cas 1.1	Cas 1.2	Cas 1.3	Cas 2.1	Cas 2.2	Cas 2.3	Unité
COP_g	1,85	1,85	1,85	1,95	1,85	1,85	-
EER_g	1,32	-	-	1,95	-	-	-
Consommation d'énergie finale annuelle	38,52	35,81	38,44	39,18	39,10	38,73	kWh/m ² .an

Tableau 5.18 : Facteurs COP_g et EER_g et consommation d'énergie finale du bâtiment pour les configurations basse consommation pour Agen

Pour la plupart des cas, les performances choisies pour les systèmes sont celles de la configuration de référence.

5.5.5 Comparaison avec la configuration de référence

Le Tableau 5.19 donne les caractéristiques de la configuration de référence et celles des six configurations basse consommation.

Facteurs	Cas de référence	Cas 1.1	Cas 1.2	Cas 1.3	Cas 2.1	Cas 2.2	Cas 2.3	Unité
U_{parois}	0,19	0,10	0,10	0,10	0,2	0,2	0,2	W/m ² K
$\sum \Psi_L$	86,02	2,04	2,04	2,04	51,87	51,87	51,87	W/K
U_w	2,54	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	-
FS	0,77	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	-
%vitrage	50	50	50	50	50	50	50	%
Inertie	Moyenne	Moyenne	Lourde	Lourde	Moyenne	Lourde	Lourde	-
Ori	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	-
Permea	0,72	0,26	0,26	0,26	0,57	0,57	0,57	vol/h sous 4 Pa
$A_{\text{éclairage}}$	11	6	6	6	6	6	6	W/m ²
Surventil	0	0	5	1,25	0	5	1,25	vol/h
Masques	0	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	-
COP_g	1,85	1,85	1,85	1,85	1,95	1,85	1,85	
EER_g	1,32	1,32	-	-	1,95	-	-	-
Systèmes de ventilation mécanique								
Simple flux	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	
Double flux	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	
Puits climatique	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui	

Tableau 5.19 : Caractéristiques de la configuration de référence et des configurations basse consommation pour Agen

Sur la Figure 5.19 nous avons porté les besoins de chauffage, les besoins de rafraîchissement et la consommation d'énergie annuelle pour l'éclairage, les équipements de bureautique et la ventilation mécanique du bâtiment pour les différentes configurations. Par rapport au bâtiment de référence, les besoins de chauffage sont réduits de 66 %, ceux de rafraîchissement de 40 % ou 100 % suivant la solution retenue.

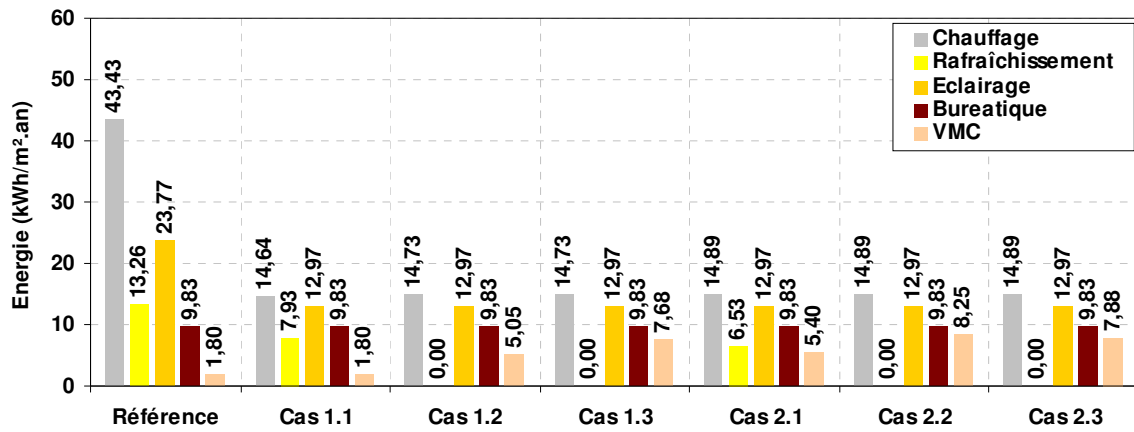


Figure 5.19 : Besoins et consommations énergétiques du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Agen

La réduction en consommation d'énergie varie, selon la configuration basse consommation, entre 44,2 % et 48,1 % (voir Figure 5.20).

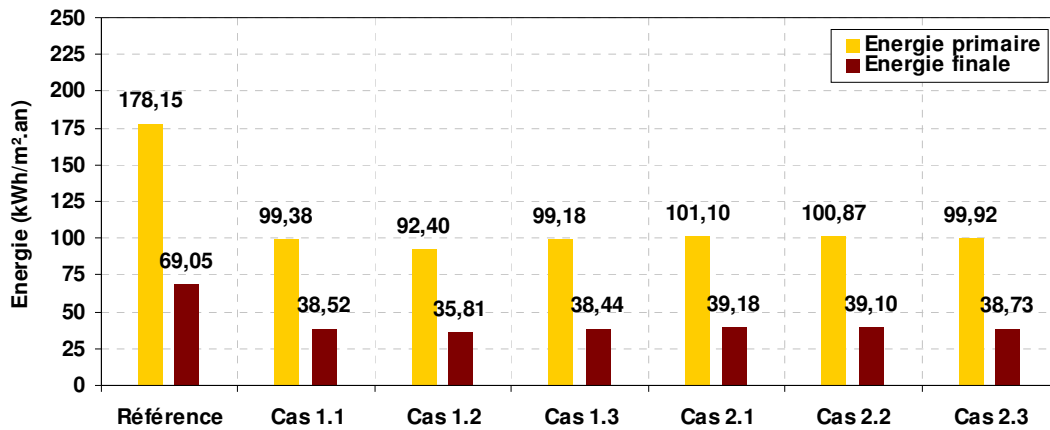


Figure 5.20 : Consommations d'énergie annuelles finale et primaire du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Agen

Quant à la réduction en émission de CO₂, elle varie entre 50 % et 53,1 % (voir Figure 5.21)

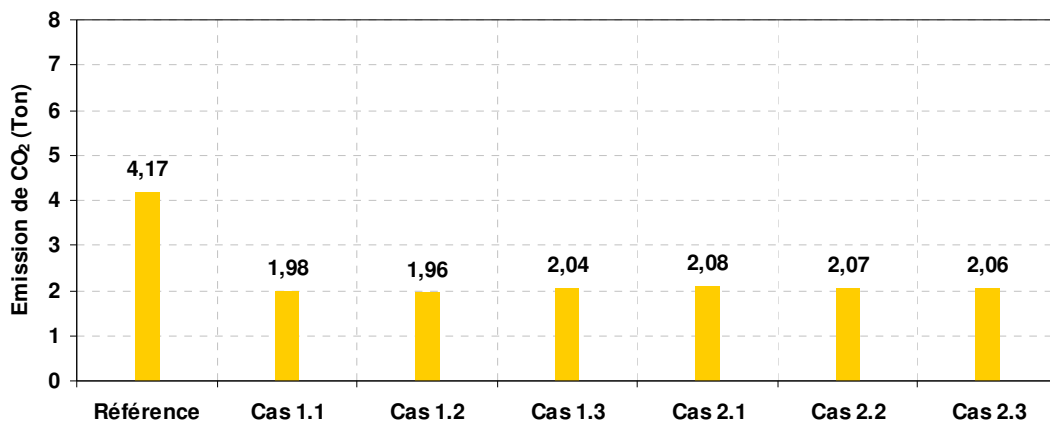


Figure 5.21 : Emission totale de CO₂ du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Agen

5.5.6 Synthèse et analyse

Les résultats obtenus pour Agen, montrent qu'il est possible d'atteindre des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an en soignant l'isolation thermique, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et sans avoir recours à une ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait. Ceci est en cohérence avec l'analyse des solutions performantes menées au chapitre 4 (voir chapitre 4, §4.3.3). De plus, l'utilisation de la ventilation double flux avec récupération de chaleur réduit les exigences sur l'enveloppe et accroît les exigences sur les performances des installations de chauffage et de rafraîchissement, à cause de l'augmentation de la consommation d'énergie des auxiliaires de la ventilation mécanique.

Enfin, les résultats montrent qu'à l'instar de Nancy, il est possible d'annuler les besoins de rafraîchissement et d'assurer ainsi le confort thermique d'été en soignant l'inertie thermique de l'enveloppe et ceci, en ayant recours à des masques solaires et en utilisant une surventilation mécanique nocturne que l'on peut associer à un puits climatique.

5.6 Application pour Nice

5.6.1 Choix de solutions pour les besoins de chauffage

La Figure 5.22 donne les intervalles des solutions pour les facteurs pour une ventilation simple flux et une ventilation double flux. Les besoins de chauffage du bâtiment pour la configuration de référence sont égaux à 19,78 kWh/m².an.

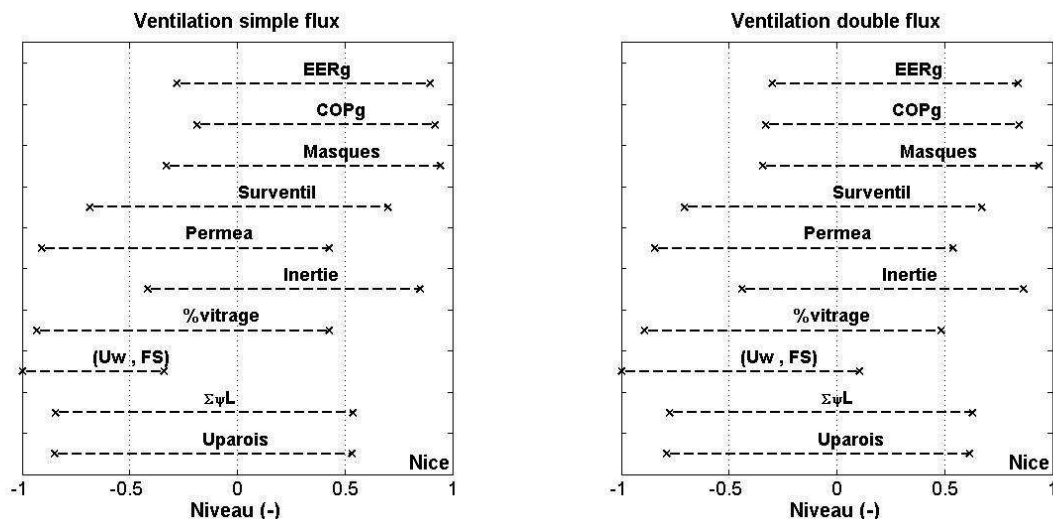


Figure 5.22 : Intervalles des solutions pour Nice

On constate que les exigences sont moins contraignantes sur les niveaux des facteurs par rapport aux climats d'Agen et de Nancy. Les solutions possibles sans et avec double flux sont plus nombreuses.

Choix d'une solution avec ventilation simple flux : Nous commençons par retenir le niveau (-1) pour le facteur *%vitrage* qui est la solution la plus rentable du point de vue énergétique et économique. Nous retenons le niveau (0) pour le facteur *inertie* dont l'impact sera principalement sur les besoins de rafraîchissement. De plus, nous retenons le niveau (0) pour le facteur *Permea*, valeur moyenne de son intervalle de solutions, de manière à ne pas trop augmenter les exigences sur les autres facteurs.

Le choix du niveau des autres paramètres, en l'occurrence $\Sigma\psi L$, *Uparois*, *Uw* et *FS* est effectué à l'aide d'abaques (voir Figure 5.23). Ces abaques montrent qu'il existe un grand nombre de solutions pour obtenir des besoins de chauffage inférieurs ou égaux à 15 kWh/m².an.

Si nous retenons, le niveau (0) pour les trois facteurs, c'est-à-dire: $U_{\text{parois}} = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\sum\psi L = 51,87 \text{ W/K}$, $U_w = 1,66 \text{ W/m}^2\text{K}$, $FS = 0,63$, les besoins de chauffage sont alors égaux à $14,76 \text{ kWh/m}^2\text{.an}$.

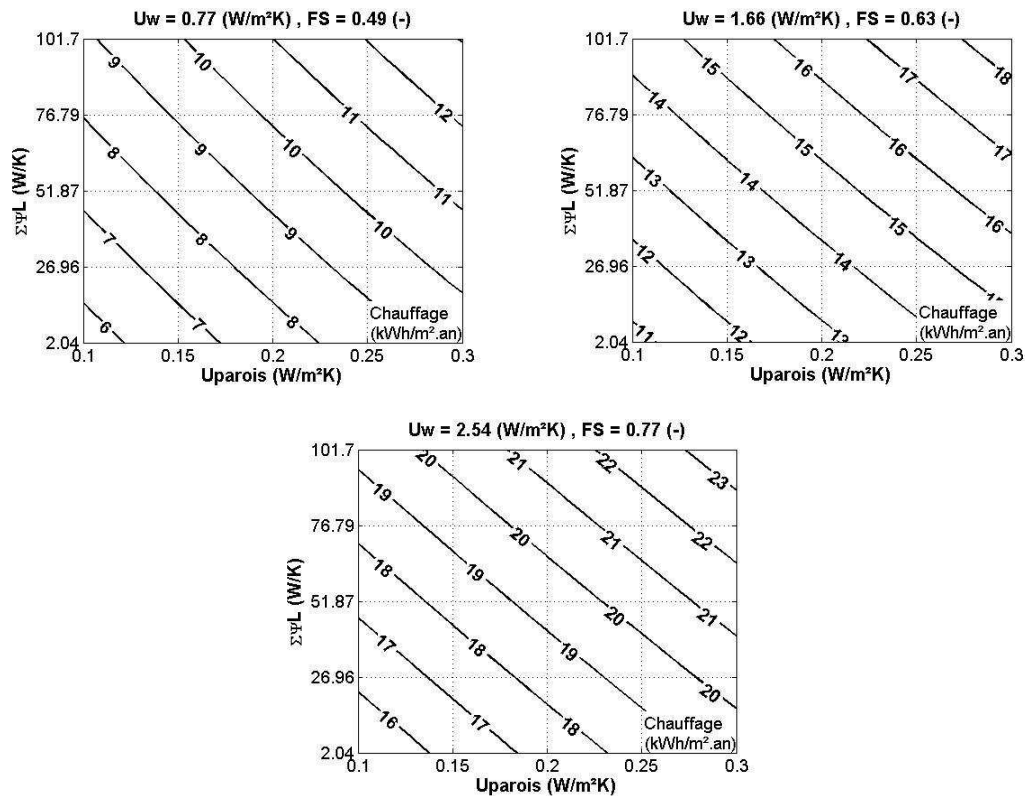


Figure 5.23 : Besoins de chauffage en fonction des facteurs U_{parois} , $\sum\psi L$, U_w et FS avec ventilation simple flux pour Nice

Choix d'une solution avec ventilation double flux : Nous suivons la même logique que précédemment. Ainsi, nous retenons le niveau (-1) pour le facteur *%vitrage* et le niveau (0) pour les facteurs *Inertie* et *Permea*.

Les besoins de chauffage en fonction des facteurs $\sum\psi L$, U_{parois} , U_w et FS sont donnés à la Figure 5.24.

Nous retenons les niveaux (+0,2) pour les facteurs U_{parois} et $\sum\psi L$ et le niveau (+1) pour les facteurs U_w et FS , soit la configuration suivante : $U_{\text{parois}} = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\sum\psi L = 61,83 \text{ W/K}$, $U_w = 2,54 \text{ W/m}^2\text{K}$, $FS = 0,77$, ce qui donne une valeur des besoins de chauffage égale à $14,85 \text{ kWh/m}^2\text{.an}$.

Le Tableau 5.20 résume les caractéristiques des deux solutions retenues.

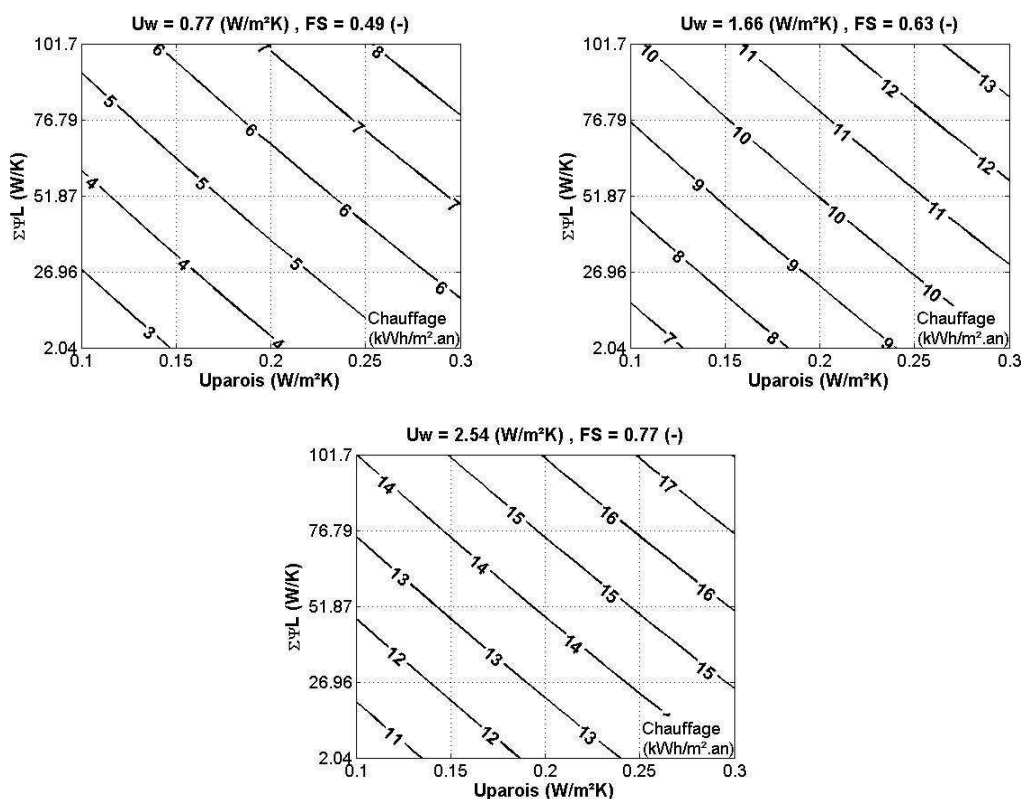


Figure 5.24 : Besoins de chauffage en fonction des facteurs Uparois, $\Sigma\psi L$, U_w et FS avec ventilation double flux pour Nice

Facteurs	Cas 1		Cas 2		Unité
	Niveau	Valeur	Niveau	Valeur	
U_{parois}	(0)	0,20	(+0,2)	0,22	W/m²K
$\Sigma\psi L$	(0)	51,87	(+0,2)	61,83	W/K
U_w	(0)	1,66	(1)	2,54	-
FS	(0)	0,63	(1)	0,77	-
%vitrage	(-1)	50	(-1)	50	%
Inertie	(0)	Moyenne	(0)	Moyenne	-
Ori	(-1)	N/S	(-1)	N/S	-
Permea	(0)	0,26	(0)	0,26	vol/h sous 4 Pa
$Al_{\text{éclairage}}$	(-1)	6	(-1)	6	W/m²
Système de ventilation mécanique					
Simple flux	Oui		Non		
Double flux	Non		Oui		

Tableau 5.20 : Caractéristiques des solutions retenues pour Nice

Pour ces solutions, le Tableau 5.11 donne les besoins de chauffage et la consommation d'énergie annuelle pour les auxiliaires de la ventilation mécanique.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1 (kWh/m².an)	Cas 1 (kWh/m².an)	Cas 2 (kWh/m².an)	Cas 2 (kWh/m².an)
Besoins de chauffage	14,63	14,76	14,90	14,85
Auxiliaires de la ventilation double flux	-	1,80	-	5,33

Tableau 5.21 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nice

5.6.2 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation simple flux

Les besoins de rafraîchissement du bâtiment pour la configuration de référence sont de 25,99 kWh/m².an (voir Chapitre 3, §3.1.7.4).

Sur la Figure 5.25 nous avons porté les besoins de rafraîchissement du bâtiment avec ventilation simple flux en fonction des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques*.

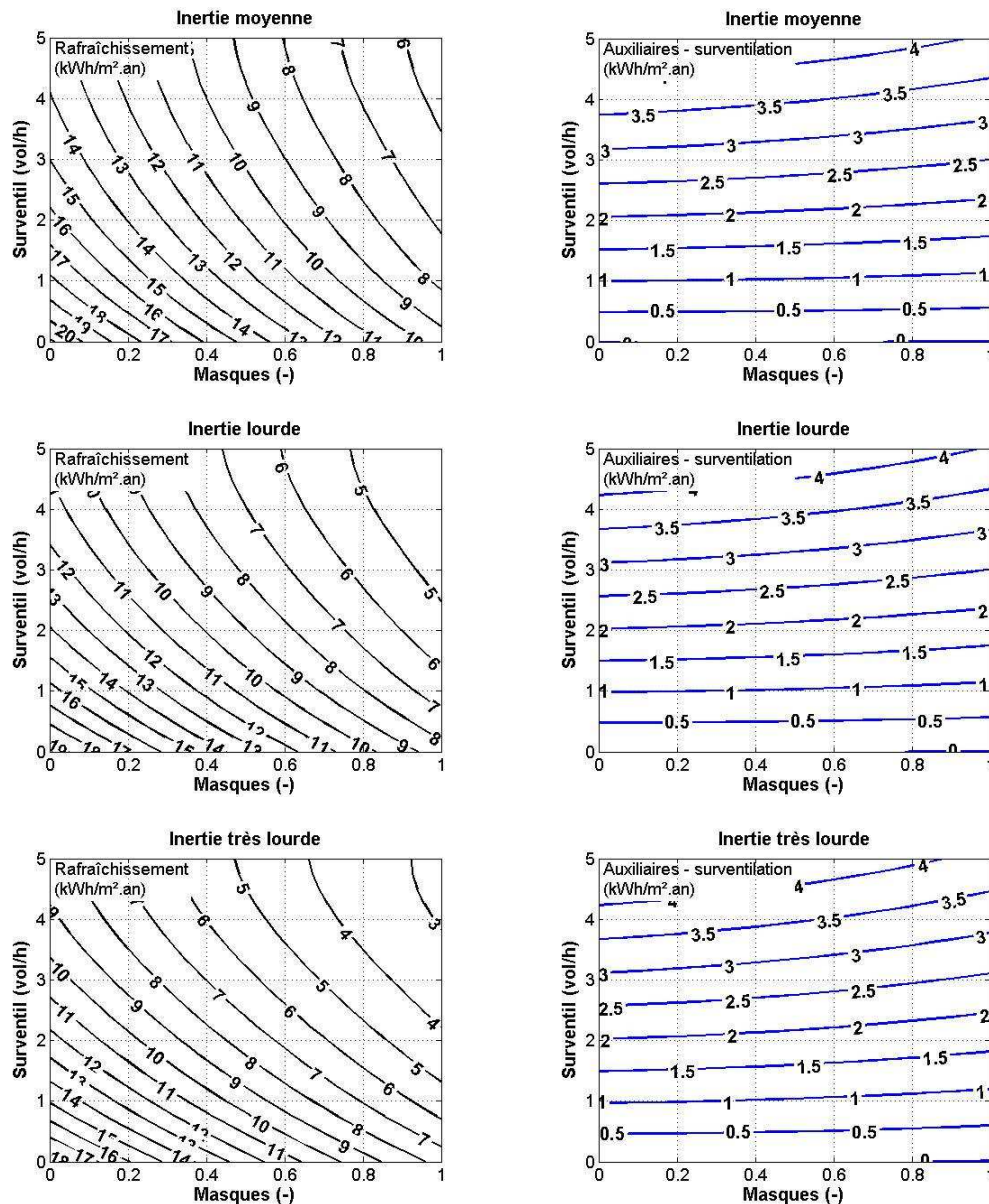


Figure 5.25 : Besoins de rafraîchissement en fonction des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques* avec ventilation simple flux pour Nice

A l'instar des deux autres climats, nous allons étudier trois solutions pour le rafraîchissement du bâtiment.

Cas 1.1 : Pour la première solution, nous considérons la configuration suivante : *Inertie moyenne*, *Masques* = 1, *Surventil* = 0 vol/h. Les besoins de rafraîchissement sont alors égaux à 9,5 kWh/m².an.

Le Tableau 5.22 donne les besoins de chauffage, de rafraîchissement et la consommation d'énergie pour la ventilation mécanique.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1.1 (kWh/m ² .an)	Cas 1.1 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,63	14,76
Besoins de rafraîchissement	9,50	9,17
Auxiliaires de la ventilation simple flux	-	1,80

Tableau 5.22 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nice

Cas 1.2 : Nous remarquons qu'il n'existe pas de solutions permettant d'aboutir à des besoins de rafraîchissement nuls. Ainsi, augmenter l'inertie thermique tout en ayant recours à des masques et à une surventilation mécanique nocturne ne permet pas de couvrir entièrement les besoins de rafraîchissement du bâtiment comme c'était le cas pour Nancy et Agen. Un système actif doit être associé à la surventilation mécanique nocturne.

Dans le Tableau 5.23, nous avons porté les besoins et la consommation des auxiliaires de ventilation pour la configuration suivante : *Inertie très lourde, Masques = 1, Surventil = 5 vol/h.*

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 1.2 (kWh/m ² .an)	Cas 1.2 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,85	14,92
Besoins de rafraîchissement	2,79	2,57
Auxiliaires de la ventilation simple flux	-	1,80
Auxiliaires de la surventilation nocturne	3,88	3,82

Tableau 5.23 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nice

Cas 1.3 : La troisième solution consiste à rafraîchir le bâtiment en utilisant une surventilation mécanique nocturne et un puits climatique. Le dimensionnement du puits climatique est effectué comme pour les villes de Nancy et Agen.

Considérons la configuration qui présente les besoins de rafraîchissement les plus faibles, soit : *Inertie très lourde, Masques = 1, Surventil = 5 vol/h.* Ces besoins sont de 2,57 kWh/m².an. La configuration de puits climatique qui offre la plus grande puissance de rafraîchissement a une efficacité de 0,9, une profondeur de 2,5 m et un débit d'air de 2190 m³/h (voir Tableau 5.6).

Grâce à l'installation de puits climatique, les besoins de rafraîchissement passent de 2,57 kWh/m².an à 1,12 kWh/m².an, soit une réduction de 1,47 kWh/m².an, avec une puissance maximale requise pour le rafraîchissement de 14 kW. De plus, la simulation numérique de cette configuration montre que le nombre d'heures de dépassement de la température opérative de 26 °C est égale à 196 h, 49 h pour 27 °C et 4 h pour 28 °C. La température opérative maximale atteinte est de 28,5 °C.

Ce niveau d'inconfort thermique d'été est relativement faible. Cependant, il ne répond pas à l'objectif défini au début de ce chapitre, à savoir une température opérative inférieure à 26 °C en période d'été (voir §5.1). La surventilation mécanique nocturne et le puits climatique ne suffisent donc pas pour assurer complètement le rafraîchissement du bâtiment. Un système actif est alors nécessaire.

A partir des trois caractéristiques du puits climatique (efficacité = 0,9, profondeur = 2,5 m, débit d'air = 2190 m³/h), nous avons déterminé à l'aide des abaques, les caractéristiques géométriques nécessaires pour obtenir une efficacité de 0,9 tout en limitant les pertes de charge (voir Figure 5.26).

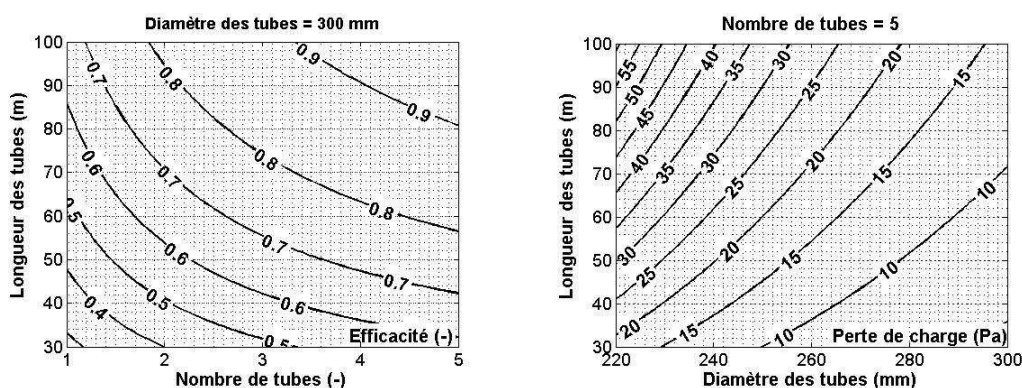


Figure 5.26 : Efficacité et pertes de charge de l'installation de puits climatique en fonction du nombre, de la longueur et du diamètre des tubes pour Nice

La configuration suivante est retenue : « 5 tubes, 82 m de longueur et 300 mm de diamètre ». Les pertes de charge linéaires sont alors égales à 11,5 Pa. A l'aide de la simulation numérique, nous avons déterminé la consommation d'énergie du ventilateur nécessaire pour véhiculer l'air extérieur à travers les tubes enterrés. Elle est de 2 kWh/m².an, valeur plus importante que la réduction de 1,57 kWh/m².an en besoins de rafraîchissement, obtenue grâce au puits climatique. La mise en œuvre de cette solution n'est donc pas intéressante et ne sera pas retenue.

5.6.3 Choix de solutions pour les besoins de rafraîchissement avec ventilation double flux

La Figure 5.27 donne les besoins de rafraîchissement du bâtiment avec ventilation double flux en fonction des facteurs *Inertie*, *Surventil* et *Masques*.

En comparant les abaques des besoins de rafraîchissement pour le cas ventilation simple flux (voir Figure 5.25) avec ceux du cas ventilation double flux (voir Figure 5.27), on peut constater que ces besoins sont plus importants pour le cas avec ventilation double flux. Ceci est dû à un type de vitrage et à une isolation différents, ce qui implique des facteurs FS , Uw , Up_{parois} et $\sum \psi L$ différents. Les niveaux de ces facteurs sont plus importants pour le cas avec ventilation double flux (voir Tableau 5.20).

Nous rappelons que le facteur FS a un effet positif sur les besoins de rafraîchissement et que les facteurs Uw , Up_{parois} et $\sum \psi L$ ont des effets négatifs (voir chapitre 4, §4.2.3), soient des influences opposées. L'effet du facteur FS étant plus important que celui des autres facteurs, les besoins de rafraîchissement augmentent.

Vu que l'analyse du couplage puits climatique et surventilation mécanique nocturne a montré que cette solution n'est pas intéressante pour le climat de Nice, elle ne sera pas évaluée ici. Ainsi, deux solutions pour le rafraîchissement du bâtiment basse consommation sont uniquement étudiées.

Cas 2.1 : Nous considérons la même configuration que celle retenue pour le cas ventilation simple flux, à savoir : *Inertie moyenne*, *Masques* = 1, *Surventil* = 0 vol/h. Les besoins de rafraîchissement sont alors de 10,69 kWh/m².an.

Les résultats en termes de besoins et de consommations d'énergie pour la ventilation mécanique sont donnés dans le Tableau 5.22.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 2.1 (kWh/m ² .an)	Cas 2.1 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,90	14,85
Besoins de rafraîchissement	10,45	10,69
Auxiliaires de la ventilation simple flux	-	5,33

Tableau 5.24 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nice

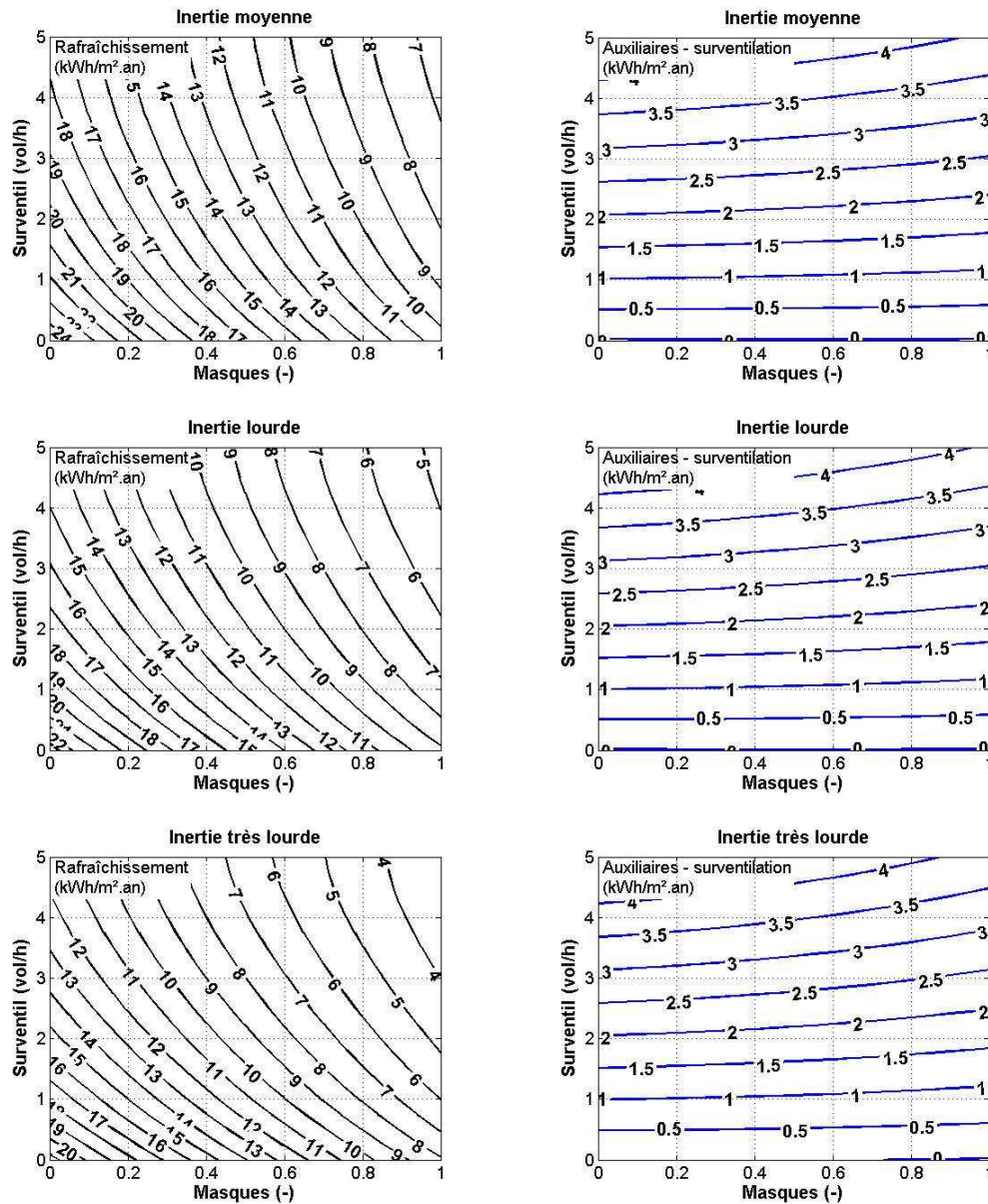


Figure 5.27 : Besoins de rafraîchissement en fonction des facteurs Inertie, Surventil et Masques avec ventilation double flux pour Nice

Cas 2.2 : Le bâtiment est rafraîchi à l'aide d'un système actif et d'une surventilation mécanique nocturne. Nous considérons également la même configuration que celle retenue pour le cas ventilation simple flux, à savoir : *Inertie très lourde*, *Masques = 1*, *Surventil = 5 vol/h*.

Le Tableau 5.23 donne les besoins de chauffage, de rafraîchissement et la consommation d'énergie pour la ventilation de cette configuration.

Besoins / Consommation d'énergie annuelle	Modèles polynômiaux	Simulation numérique
	Cas 2.2 (kWh/m ² .an)	Cas 2.2 (kWh/m ² .an)
Besoins de chauffage	14,35	14,76
Besoins de rafraîchissement	3,26	3,84
Auxiliaires de la ventilation simple flux	-	5,33
Auxiliaires de la surventilation nocturne	3,85	3,15

Tableau 5.25 : Besoins de chauffage, de rafraîchissement et consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la ventilation mécanique du bâtiment pour Nice

5.6.4 Choix des performances des systèmes de chauffage et de rafraîchissement

Pour le climat de Nice, le facteur de performance global du système de chauffage COP_g pour la configuration de référence est de 1,61. L'efficacité globale du système de rafraîchissement EER_g est de 1,77 (voir chapitre 3, §3.1.7.6).

Les Figure 5.28 et Figure 5.29 donnent les valeurs de la consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g respectivement avec ventilation simple et ventilation double flux.

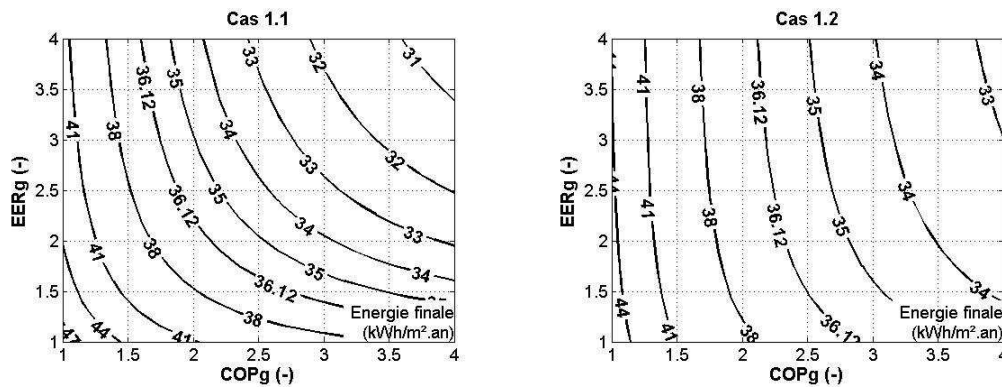


Figure 5.28 : Consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g pour le cas ventilation simple flux pour Nice

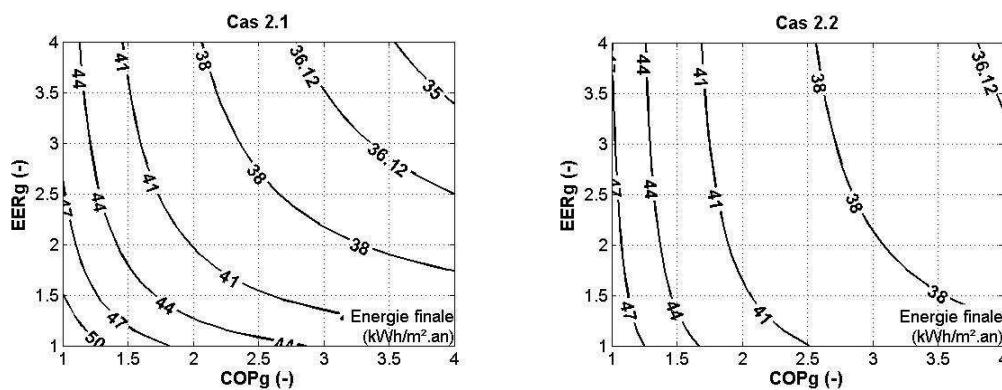


Figure 5.29 : Consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g pour le cas ventilation double flux pour Nice

Il apparaît qu'il est nécessaire que les niveaux des facteurs COP_g et EER_g soient supérieurs à ceux de la configuration de référence pour obtenir une consommation d'énergie finale annuelle inférieure ou égale à 36,12 kWh/m².an. De plus, les niveaux nécessaires des facteurs COP_g et EER_g sont supérieurs pour les cas ventilation double flux comparés aux cas ventilation simple flux.

En effet, à l'instar du climat d'Agen, en comparant les solutions sans et avec ventilation double flux, on peut remarquer qu'elles ont des besoins de chauffage et de rafraîchissement très proches, et que les consommations des auxiliaires sont plus importantes avec la ventilation double flux, ce qui se traduit par des niveaux de performances requises supérieures.

Le Tableau 5.26 donne les valeurs retenues pour les facteurs COP_g et EER_g ainsi que la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment pour les configurations basse consommation. Nous avons sélectionné les niveaux minimaux nécessaires des facteurs COP_g et EER_g , en considérant arbitrairement des valeurs identiques pour les deux coefficients.

	Cas 1.1	Cas 1.2	Cas 2.1	Cas 2.2	Unité
COP_g	2,10	2,30	3,20	3,85	-
EER_g	2,10	2,30	3,20	3,85	-
Consommation d'énergie finale annuelle	36,00	36,02	36,11	36,11	kWh/m ² .an

Tableau 5.26 : Facteurs COP_g et EER_g et consommation d'énergie finale du bâtiment pour les configurations basse consommation pour Nice

Les niveaux retenus pour les facteurs COP_g et EER_g sont supérieurs à ceux de Nancy et Agen. Ceci est dû à des exigences plus contraignantes pour la consommation d'énergie finale à Nice et à des besoins énergétiques très proches pour les solutions proposées pour les trois climats.

En effet, il aurait fallu réduire les besoins de chauffage à des niveaux plus bas de ce qui a été retenu pour Nice, afin de réduire les exigences sur les facteurs COP_g et EER_g . Ceci montre qu'une réduction jusqu'à 15 kWh/m².an n'est pas forcément suffisante pour Nice qui est un climat chaud avec des besoins de chauffage moins importants dans le bilan énergétique global comparé à Nancy et Agen.

Considérons, à titre d'exemple, la Figure 5.24 qui donne les besoins de chauffage en fonction des facteurs $\sum \psi L$, U_{parois} , U_w et FS avec ventilation double flux. On remarque qu'il est possible de descendre à des besoins de chauffage plus bas que 15 kWh/m².an allant même jusqu'à des valeurs inférieures à 3 kWh/m².an. Nous allons donc tracer les abaques de la consommation d'énergie finale annuelle pour les cas ventilation double flux, en imposant des besoins de chauffage égaux à 3 kWh/m².an, à la place de 14,76 kWh/m².an et 14,92 kWh/m².an qui avaient été retenus auparavant, les autres besoins et consommations énergétiques étant toujours les mêmes (voir Figure 5.30). On constate qu'en réduisant les besoins de chauffage, les niveaux requis des coefficients COP_g et EER_g sont considérablement réduits permettant même de sélectionner des niveaux de performances inférieurs à ceux de Nancy et Agen.

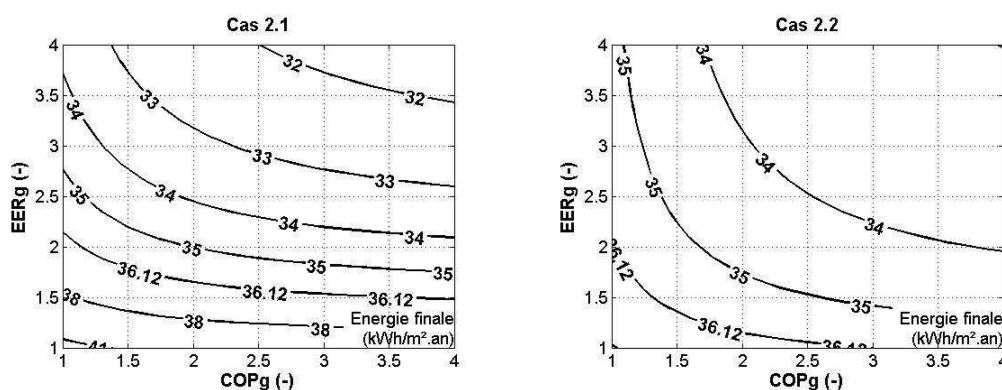


Figure 5.30 : Consommation d'énergie finale annuelle en fonction des facteurs COP_g et EER_g pour le cas ventilation double flux pour Nice

5.6.5 Comparaison avec la configuration de référence

Par analogie autres climats, nous allons comparer les configurations basse consommation à la configuration de référence en termes de performances énergétiques et d'émission de CO₂.

Le Tableau 5.19 donne les caractéristiques de la configuration de référence et celles des deux configurations basse consommation.

Facteurs	Cas de référence	Cas 1.1	Cas 1.2	Cas 2.1	Cas 2.2	Unité
U_{parois}	0,19	0,20	0,20	0,22	0,22	W/m ² K
$\sum \Psi_L$	86,02	51,87	51,87	61,83	61,83	W/K
U_w	2,54	1,66	1,66	2,54	2,54	-
FS	0,77	0,63	0,63	0,77	0,77	-
%vitrage	50	50	50	50	50	%
Inertie	Moyenne	Moyenne	Très lourde	Moyenne	Très lourde	-
Ori	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	-
Permea	0,72	0,26	0,26	0,26	0,26	vol/h sous 4 Pa
$AI_{\text{éclairage}}$	11	6	6	6	6	W/m ²
Surventil	0	0	5	0	5	vol/h
Masques	0	1	1	1	1	-
COP _g	1,61	2,15	2,30	3,20	3,85	-
EER _g	1,77	2,15	2,30	3,20	3,85	-
Systèmes de ventilation mécanique						
Simple flux	Oui	Oui	Oui	Non	Non	
Double flux	Non	Non	Non	Oui	Oui	
Puits climatique	Non	Non	Non	Non	Non	

Tableau 5.27 : Caractéristiques de la configuration de référence et des configurations basse consommation pour Nice

Les besoins de chauffage sont réduits de 25 %. La réduction des besoins de rafraîchissement varie entre 65 % et 90 % (Figure 5.31).

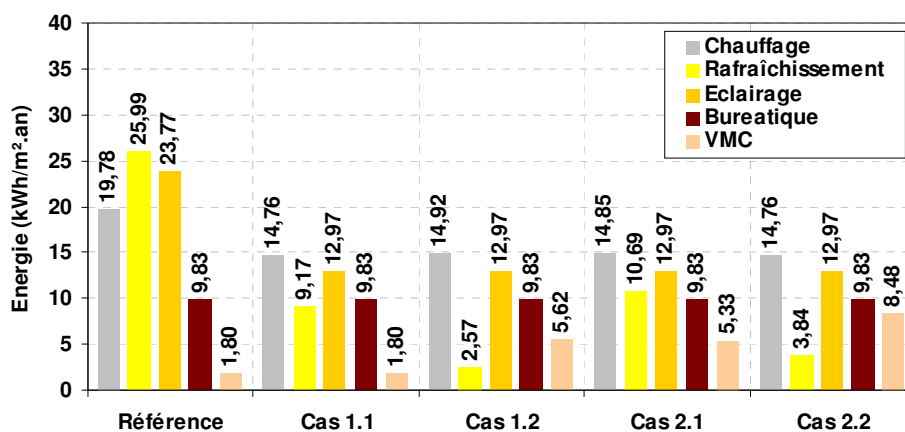


Figure 5.31 : Besoins et consommations énergétiques du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Nice

La réduction en consommation d'énergie annuelle finale et primaire est de 42 % (voir Figure 5.32).

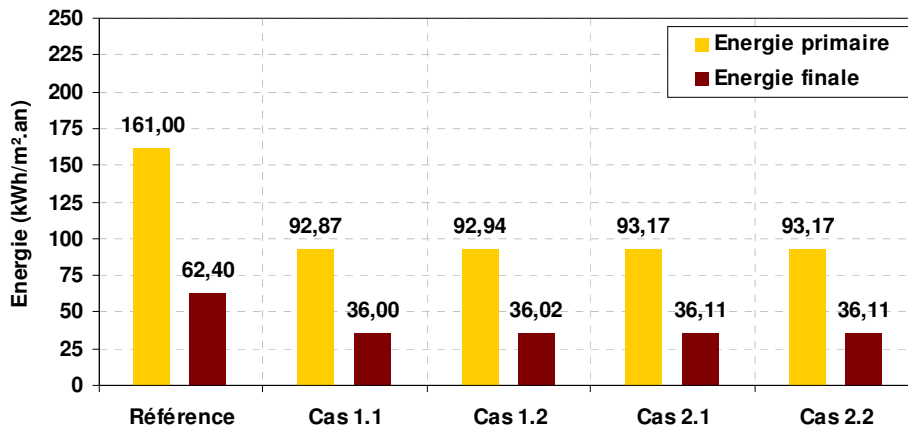


Figure 5.32 : Consommations d'énergie annuelles finale et primaire du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Nice

Quant à la réduction en émission de CO₂, elle varie entre 36,4 % et 41,5 % (voir Figure 5.33).

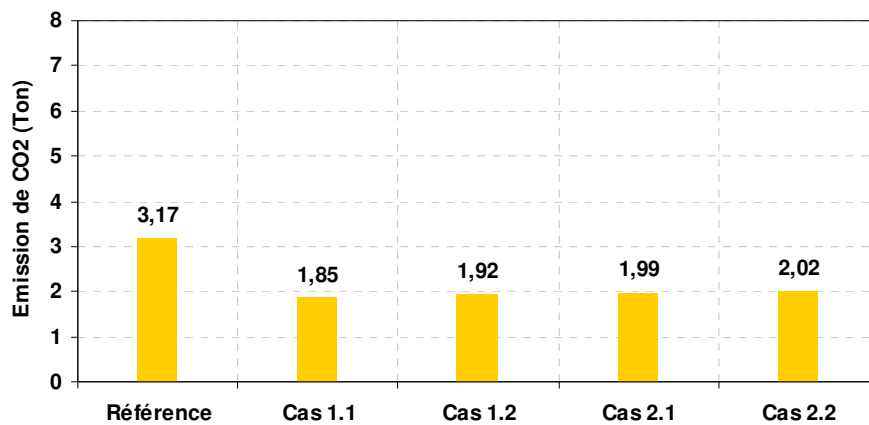


Figure 5.33 : Emission totale de CO₂ du bâtiment pour la configuration de référence et les configurations basse consommation pour Nice

5.6.6 Synthèse et analyse

Les résultats obtenus pour le climat de Nice, montrent qu'atteindre des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an est relativement facile comparé aux autres climats étudiés, ceci est possible avec ou sans ventilation double flux. Ces conclusions ont été identifiées lors de l'analyse des solutions performantes au chapitre 4 (voir chapitre 4, §4.3.3).

En revanche, nous avons constaté que les niveaux requis pour les facteurs COP_g et EER_g sont supérieurs à ceux de Nancy et Agen. Ceci est dû à des exigences plus contraignantes pour la consommation d'énergie finale à Nice et à des besoins énergétiques très proches pour les solutions proposées pour les trois climats. En effet, ce climat est chaud avec des besoins de chauffage moins importants dans le bilan énergétique global comparé à Nancy et Agen. Il est donc nécessaire de réduire d'avantage les besoins de chauffage en dessous de 15 kWh/m².an pour réduire les exigences sur les performances des systèmes de chauffage et de rafraîchissement.

Enfin, les résultats montrent qu'il est nécessaire d'avoir recours à un système actif pour le rafraîchissement du bâtiment. Les solutions évaluées à savoir, l'utilisation de masques solaires, l'augmentation de l'inertie thermique, le recours à une surventilation nocturne couplée à un puits climatique n'ont pas été suffisantes pour le rafraîchissement du bâtiment.

5.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la recherche de solutions pour la configuration de référence du bâtiment Beethoven, dans le but d'atteindre les exigences des labels Passivhaus et Effinergie, tout en gardant le même niveau de confort thermique d'été. Cette recherche a été réalisée à l'aide des modèles polynômiaux développés dans le chapitre 4. Les climats considérés ont été Nancy, Agen et Nice.

Nous avons montré que la méthodologie que nous proposons permet d'identifier, de manière simple et rapide, des solutions permettant de concevoir un bâtiment à basse consommation d'énergie. Ceci est effectué grâce à des abaques déterminés à l'aide des modèles polynômiaux et qui ont permis de sélectionner des solutions pour obtenir un bâtiment à basse consommation d'énergie. On a pu se passer en grande partie de la simulation numérique pour identifier des solutions. La simulation numérique a été utilisée uniquement pour évaluer le potentiel du puits climatique et pour vérifier la précision des modèles polynômiaux. Le niveau de précision obtenu est appréciable.

Nous avons présenté plusieurs exemples de solutions pour chaque climat sans pourtant effectuer un choix final. Pour cela, il est nécessaire d'introduire de nouveaux critères ou contraintes tels que, par exemple, une analyse technico-économique et de cycle de vie.

Les solutions présentées ont été comparées à la configuration de référence en termes de performance énergétique et d'émission de CO₂. Les résultats obtenus sont en cohérence avec l'analyse de solutions performantes effectuée au chapitre 4.

Pour Nancy, il apparaît qu'il est possible de respecter les labels Passivhaus et Effinergie en ayant recours systématiquement à une ventilation double flux avec récupération de chaleur, en soignant l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe. Nous avons également montré que si la conception de l'enveloppe est soignée, les systèmes de chauffage et éventuellement de rafraîchissement, pourront avoir des coefficients COP_g et EER_g proches de 1. Enfin, le rafraîchissement du bâtiment sans avoir recours à un système thermodynamique de production de froid (rafraîchissement passif) peut être atteint sans trop de contraintes.

Le respect des exigences des labels Effinergie et Passivhaus peut se faire à Agen avec des exigences moins importantes sur l'enveloppe par rapport à Nancy. Le recours à une ventilation double flux avec récupération de chaleur n'est pas obligatoire. De plus, il est à noter que comme Nancy, le rafraîchissement passif du bâtiment est possible.

Comparé à Nancy et Agen, atteindre des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m².an à Nice nécessite des exigences moindres sur l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et ceci sans avoir recours à une ventilation double flux avec récupération. De plus, il apparaît qu'il est nécessaire d'utiliser un système actif thermodynamique pour le rafraîchissement.

Pour le même niveau de besoins et de consommations énergétiques; nous avons constaté que les niveaux requis pour les facteurs COP_g et EER_g sont supérieurs à Nice comparé à Nancy et Agen, à causes d'exigences plus contraignantes pour la consommation d'énergie finale. Ces niveaux peuvent être réduits en réduisant d'avantage les besoins de chauffage en dessous de 15 kWh/m².an.

Enfin, il aurait été possible d'intégrer dans les modèles polynômiaux des paramètres supplémentaires à ceux que nous avons considérés. Nous pouvons citer à titre d'exemple, l'efficacité thermique du récupérateur du système de ventilation double flux, les paramètres du puits climatique comme la profondeur d'enfouissement des tubes, l'efficacité globale et le débit d'air, les rendements des ventilateurs de la surventilation mécanique nocturne, de la ventilation simple flux et double flux. Par ailleurs, la prise en compte des paramètres du puits climatique aurait limitée d'avantage le recours à la simulation numérique.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était le développement d'une méthodologie pour mener à bien des études de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Le principe de la méthodologie a été de développer à l'aide d'outils de simulation numérique et en se basant sur la méthode des plans d'expériences, des modèles polynômiaux pour l'évaluation des performances énergétiques et du confort thermique des bâtiments. Le choix de la méthode des plans d'expériences a été motivé par sa facilité de mise en œuvre et son efficacité pour simplifier les études paramétriques, tout en gardant une précision satisfaisante sur les résultats. Les modèles développés ont ainsi pu être substitués aux outils de simulation numérique dans la recherche de solutions pour la conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Ils ont été appliqués sur un immeuble de bureaux, dans le but d'obtenir un bâtiment selon les exigences des labels Effinergie et Passivhaus.

Tout d'abord, nous avons réalisé un état de l'art des bâtiments à basse consommation d'énergie. Celui-ci a permis de mettre en évidence les solutions concernant la conception de l'enveloppe et les systèmes du génie climatique, permettant de concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie.

La deuxième étape nous a permis de nous doter de modèles numériques adéquats que nous avons choisis d'implémenter dans l'environnement informatique MATLAB/Simulink et plus particulièrement dans la bibliothèque SIMBAD. Nous avons présenté également dans cette étape, des études d'évaluation énergétique de systèmes spécifiques aux bâtiments à basse consommation d'énergie qui ont été réalisées grâce à ces modèles.

Disposant des connaissances nécessaires et d'un outil adapté pour l'analyse des bâtiments à basse consommation d'énergie, nous nous sommes intéressés au développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Nous avons sélectionné comme cas d'étude un immeuble de bureaux à trois niveaux, nommé Beethoven. Les caractéristiques de référence de ce bâtiment, que nous avons appelée « configuration de référence » ont été choisies à partir des exigences de la réglementation thermique en vigueur. Le système de ventilation de ce bâtiment est une ventilation simple flux par extraction, l'installation de chauffage et de rafraîchissement est une pompe à chaleur air-eau réversible qui alimente des unités terminales de type ventilo-convecteurs 2 tubes-2 fils. Les performances énergétiques de ce bâtiment pour la configuration de référence, ont été évaluées par rapport aux huit zones climatiques définies par la réglementation thermique. Trois climats représentatifs ont été retenus pour la suite de l'étude, à savoir Nancy, Agen et Nice.

Après la description des principes de base de la méthode des plans d'expériences, nous avons justifié son choix à l'aide d'un exemple d'application pour une étude d'optimisation des besoins de chauffage du bâtiment Beethoven. Cet exemple a consisté à déterminer à l'aide de la méthode des plans d'expériences et des modèles numériques développés, un modèle polynômial permettant d'évaluer les besoins de chauffage du bâtiment Beethoven en fonction des caractéristiques de l'enveloppe et des gains internes, soit au total 9 paramètres.

Une étude paramétrique comprenant 9 paramètres à 3 niveaux chacun, comporte $3^9 = 19683$ combinaisons possibles, c'est-à-dire 19683 simulations numériques à effectuer soit une très longue durée de simulation, alors que le nombre de simulations numériques nécessaires pour la détermination du polynôme grâce à la méthode des plans d'expériences est de 81 simulations. Le modèle polynomial obtenu présente une précision satisfaisante par rapport à la simulation numérique, ce qui rend possible son utilisation pour déterminer les 19602 combinaisons restantes et optimiser ainsi les besoins de chauffage du bâtiment.

Le choix de la méthode des plans d'expériences pour la méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie étant justifié, nous nous sommes intéressés aux développements des modèles polynômiaux pour améliorer les performances énergétiques du bâtiment Beethoven.

Nous avons évalué les limites de la méthode des plans d'expériences par une étude paramétrique en thermique du bâtiment. Cette méthode a permis de déterminer les besoins de chauffage et la consommation d'énergie des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne avec une bonne précision. Par contre, la précision obtenue pour les besoins de rafraîchissement, du confort thermique et de la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment, s'est avérée être insuffisante. En effet, cette méthode n'est pas adaptée à des études prenant en compte un grand nombre de paramètres à variation importante non linéaire, comme c'est souvent le cas dans notre problématique. Afin de résoudre ce problème, nous avons mis en place une méthodologie permettant de contourner cette difficulté en adaptant la méthode des plans d'expériences au problème que l'on cherche à résoudre. Cette méthodologie s'applique de manière séquentielle et consiste à coupler des plans d'expériences standards de manière à intégrer de nouveaux coefficients aux modèles polynômiaux et améliorer ainsi leur qualité en obtenant plus de précision sur les réponses modélisées.

Disposant de modèles polynômiaux d'une précision satisfaisante, nous avons utilisé ces modèles pour réaliser une étude de sensibilité et déterminer des solutions permettant de concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie pour Nancy, Agen et Nice.

L'étude de sensibilité a montré que les facteurs qui ont le plus d'influence sur les besoins de chauffage concernent les caractéristiques thermiques et la perméabilité à l'air de l'enveloppe. L'effet le plus important est celui du coefficient de transmission des parois vitrées. Quant aux besoins de rafraîchissement et le confort thermique d'été, il est apparu que les facteurs les plus influents sont l'inertie thermique, la surventilation mécanique nocturne et les facteurs relatifs aux apports solaires tels que les masques, le facteur solaire et le pourcentage de parois vitrées. De plus, il a été constaté que l'augmentation de l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe peut augmenter les besoins de rafraîchissement et détériorer ainsi le confort thermique d'été.

Cette étude a également montré que parmi les différents facteurs considérés, le coefficient de performance global de l'installation de chauffage a le plus grand effet sur la consommation d'énergie finale pour les trois climats. L'éclairage artificiel et le coefficient de transmission des parois vitrées ont également des effets importants. L'efficacité globale du système de rafraîchissement a un effet négligeable à Nancy, limité à Agen et significatif à Nice. Logiquement, le débit de surventilation nocturne possède le plus grand effet sur la consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne. L'inertie thermique et les facteurs relatifs aux apports solaires influencent également ces consommations, vu que la gestion de la surventilation dépend de la température opérative intérieure. Enfin, nous avons constaté que l'orientation du bâtiment a un effet réduit sur les performances énergétiques et le confort thermique d'été lorsque l'enveloppe est correctement conçue.

Par la suite, nous avons identifié les caractéristiques de l'enveloppe et des systèmes associés pour le bâtiment Beethoven, permettant d'obtenir un bâtiment satisfaisant aux exigences des labels Allemand Passivhaus et Français Effinergie pour les trois climats.

L'analyse des résultats nous a permis de dégager des lignes directrices pour la conception des bâtiments. Pour le climat de Nancy, il est impératif de prévoir un système de ventilation double flux, un triple vitrage à faible émissivité et de porter une attention particulière à l'isolation thermique de l'enveloppe. De moindres exigences ont été identifiées pour les autres climats, où la ventilation double flux n'est pas absolument nécessaire si l'isolation thermique de l'enveloppe et l'étanchéité à l'air ont un bon niveau. De plus, il est apparu qu'il fallait avoir des systèmes de chauffage et de rafraîchissement plus performants à Nice qu'à Nancy et Agen, si la réduction des besoins de chauffage est limitée à des valeurs proches des 15 kWh/m².an exigés par le label Passivhaus.

Nous avons également évalué des solutions passives pour le rafraîchissement du bâtiment, à savoir l'utilisation de masques solaires, l'augmentation de l'inertie thermique et le recours à une surventilation mécanique nocturne que l'on peut associer à un puits climatique. Ces solutions ont permis d'assurer le confort thermique d'été pour les climats de Nancy et Agen, tandis que pour le climat de Nice, un système actif s'est avéré indispensable.

La méthodologie que nous proposons a permis d'identifier, de manière simple et rapide, des solutions permettant de concevoir des bâtiments à basse consommation d'énergie. Ceci a été réalisé à l'aide d'abaques déterminés avec les modèles polynomiaux pour sélectionner les solutions. La simulation numérique a uniquement été utilisée pour évaluer le potentiel du puits climatique et pour vérifier les résultats des modèles polynômiaux. Il est à souligner que le choix des solutions a été effectué parmi des millions de configurations que nous avons déterminées à l'aide des modèles polynômiaux. La détermination de toutes ces configurations est difficile voire impossible à réaliser directement à l'aide de la simulation numérique sans avoir recours à des modèles polynomiaux, d'où l'avantage d'une telle méthodologie.

La méthodologie mise au point peut être appliquée à différents types de bâtiments. Néanmoins, les modèles polynômiaux déterminés pour l'évaluation des performances énergétiques d'un bâtiment donné ne sont pas systématiquement transposables pour un autre bâtiment. Ceci est dû à des paramètres qui ont été fixés a priori et n'ont pas été pris en compte comme variables dans l'application de la méthodologie. Parmi ces paramètres, nous pouvons citer à titre d'exemple, la compacité du bâtiment, la gestion de protections solaires mobiles, le profil d'occupation, les gains internes et le débit de renouvellement d'air en occupation. Les modèles polynômiaux ne seront pas utilisables pour un nouveau bâtiment si l'un de ces paramètres change.

Ainsi, il s'avère intéressant de développer des modèles polynômiaux en intégrant de nouveaux facteurs de manière à se rapprocher d'avantage de modèles adimensionnels applicables par exemple sur une typologie de bâtiments. Ces modèles polynômiaux peuvent constituer une base pour le développement d'outils d'aide à la décision, destinés aux différents acteurs du secteur du bâtiment, pour concevoir des bâtiments à basse consommations d'énergie, à énergie positive et pour la rénovation thermique des bâtiments existants.

De plus, nous avons pu remarquer que les coefficients des modèles polynômiaux changent en passant d'un climat à un autre. Ainsi, un modèle polynômial qui a été déterminé pour un climat donné, ne peut pas a priori être utilisé pour un climat différent. Dans un premier temps, nous préconisons de déterminer les polynômes correspondants pour les différentes zones climatiques définies dans la réglementation thermique. Une étude plus approfondie constitue une des perspectives de ce travail.

Une autre perspective pourrait être d'intégrer dans les modèles polynomiaux des paramètres traitant les sources d'énergie renouvelables, comme par exemple, la géothermie et le photovoltaïque. Prenons l'exemple du puits climatique, nous avons identifié pour ce système, trois facteurs permettant de le caractériser dans les modèles polynomiaux, à savoir la profondeur d'enfouissement des tubes, l'efficacité globale et le débit d'air. La prise en

compte de tels paramètres dans les modèles polynomiaux permet de limiter le recours à la simulation numérique pour la recherche de solutions.

Enfin, la méthodologie proposée peut également servir à réaliser des études d'optimisation technico-économique et d'impacts environnementaux. En effet, dans le cas où l'on peut exprimer la contenance en gaz à effet de serre et le coût global (y compris mis en œuvre, maintenance et fonctionnement) des solutions, en fonction des domaines de variations des facteurs, il est possible de développer des modèles polynômiaux qui expriment l'impact économique et écologique des solutions en fonction des niveaux des facteurs. Ces relations peuvent également être exprimées sous forme d'abaques que l'on peut associer à des abaques de performances énergétiques et de confort thermique pour sélectionner des solutions optimales selon les critères d'énergie, de confort thermique, d'économie et d'impact environnemental.

Références bibliographiques

- ADEME (2007). *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*. Site Web : <http://www.ademe.fr>.
- ADEME (2006a). *Suivi et évaluation énergétique du Plan Soleil, Chauffe-eau solaires individuels Synthèse du programme de suivi sur sites*. Disponible sur <http://www.ademe.fr>.
- ADEME (2006b). *Etude qualitative et quantitative du fonctionnement de Systèmes solaires combinés en usage réel, Synthèse du programme de suivi sur sites*. Disponible sur <http://www.ademe.fr>.
- ADEME (2006c). *Les 1000 mots clés du bois - énergie*. Disponible sur <http://www.ademe.fr>.
- ADEME (2005a). *Les chiffres clés du bâtiment – Editions 2005*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ADEME (2005b). *Bilan Carbone - Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées (version 3.0)*.
- ADEME (2004). *Guide pratique ADEME Les éoliennes*. Disponible sur <http://www.ademe.fr>.
- ADEME (2003). *L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment, Retour d'expérience en France du Projet Européen Hip Hip, Avancées et réalisations*. Disponible sur <http://www.ademe.fr>.
- ADEME (1993). *Bureaux : programmer, concevoir, gérer les bâtiments à hautes performances énergétiques*.
- Ahmad M. A., Bontemps A., Sallée H., Quenard D. (2006). *Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material*, Energy and Buildings, Volume 38, pp 673-681.
- AICVF (1999). *Guide de conception des installations de climatisation et de conditionnement de l'air, Tertiaire et industrie*. Guide N° 10 de l'AICVF, pp147.
- Al-Ajmi F., Loveday D.L., Hanby V.I. (2006). *The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate*. Building and Environment volume 41, pp 235-244.
- Al-Ajmi F., Hanby VI., Loveday DL. (2002). *Thermal performance of the sub-soil environment in dry desert climate*, ASHRAE Transaction 108 pt. 2.
- Al-Ajmi F., Hanby VI., Loveday DL. (2002). *Thermal performance of the sub-soil environment in dry desert climate*, ASHRAE Transaction 108 pt. 2.

- Al-Ajmi F., Loveday D.L., Hanby V.I. (2006). *The cooling potential of earth–air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate*, Building and Environment, Volume 41, pp 235–244.
- Alessandrini J.M., Bolher A., Fleury E., Marchio D., Millet J.R., Roujol S., Stabat P. (2002). *Étude de la sensibilité et validation in situ de la méthode ConsoClim*, Rapport final, CSTB - Ecole des Mines de PARIS.
- ASI (1987). *Taguchi methods, Orthogonal Arrays And Linear Graphs, Tools for Quality Engineering*. American supplier institute, INC.
- Blümel E., Fink C., Wagner W., Jähnig D. (2005). *Das ChristophorusHaus – Monitoringergebnisse aus dem ersten Betriebsjahr des Passivhaus-Büro-und Verwaltungsgebäudes*. Proceedings of the 9th International Passivhaus conference, Ludwigshafen, Germany.
- Bojic M., Trifunovic N., Papadakis G., Kyritsis S. (1997). *Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building*, Energy, Volume 22, Issue 12, pp 1151-1158.
- Bohler A. et al (2003). *Système de climatisation à faible consommation d'énergie – Guide de faisabilité et de pré-dimensionnement*. Guide technique.
- Boyer M. (2007). *Modélisation des systèmes compacts pour le chauffage, la production de l'ECS, le refroidissement et la ventilation des maisons passives*. Rapport de stage, CSTB.
- Brandemuhel M., Gabel S., Andersen I. (1993). *HVAC2 TOOLKIT, A Toolkit for secondary HVAC system energy calculations*, University of Colorado at Boulder, USA.
- Breesch H., Bossaer A., Janssens A. (2005). *Passive cooling in a low-energy office building*. Solar Energy, Volume 79, Issue 6, pp 682-696.
- Cepheus (2001). Site Web : <http://www.cephus.de>
- Chiche M (2006). *Evaluation des performances énergétiques et du confort thermique d'été des maisons en ossature bois*. Rapport de stage, CSTB.
- Chlela F., Alessandrini J.M., Husaunndee A., Inard C. (2007a). *Rafraîchissement passif des bâtiments tertiaires à l'aide de matériaux à changement de phase*. VIIIème Colloque Interuniversitaire Franco – Québécois, Montréal, Canada, pp 317 - 322.
- Chlela F., Fleury E., François C., Quenard D., Weckstein M., Caccavelli D. (2005). *Feuille de route vers des bâtiments neufs et existants très basse consommation énergétique voire à énergie positive*. CSTB, Rapport DDD/DE/PEB 2005-067R.
- Chlela F., Husaunndee A., Inard C., Kartachi Y., Riederer P (2006a). *Numerical evaluation of earth to air heat exchangers and heat recovery ventilation systems*. Proceedings of the 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings, Lyon, France, Volume 3, pp 601 – 606.
- Chlela F., Husaunndee A., Inard C., Riederer P (2007b). *Numerical evaluation of earth to air heat exchangers and heat recovery ventilation systems*. The International journal of ventilation, ISSN 1473 – 3315, Volume 6, No 1.
- Chlela F., Husaunndee A., Inard C., Riederer P (2006b). *Energy consumption and greenhouse gases emission reduction of a dwelling*. Proceedings of the 17th Air-conditioning and Ventilation Conference, Prague, Czech Republic, pp 109 – 115.

- Giardina J. (1995). *Evaluation of ground coupled heat pumps for the state of Wisconsin*. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of masters of Science mechanical engineering. University of Wisconsin Madison
- CONSOCLIM (1999). Méthode de calcul des consommations d'énergie des bâtiments climatisés « CONSOCLIM ». Rapport final.
- Colombier N., Butoier F., Diot F. (1996). *Bâtiment type de bureaux et scénarios types associés*. Etude réalisée par EDF
- Couillaud N. (2006). *Amélioration de l'efficacité énergétique des réseaux hydraulique : optimisation de la conception*. Thèse de doctorat, CSTB.
- Cron, F., El Mankibi, M., Inard, C., Michel, P. (2002). Experimental and numerical analysis of a hybrid ventilated room, Proceedings of ROOMVENT 2002, Copenhagen, Denmark, pp 273-278.
- CSTB (2006). *Comparaison internationale bâtiment et énergie*, Rapport intermédiaire, disponible au : <http://www.prebat.net/>
- CSTB (2004). *Utilisation des matériaux à changement de phase en climatisation passive d'été et chauffage d'intersaison*. Convention ADEME n° 04 04 C 0073.
- CSTB, ARMINES (2005). *Quelles solutions pour les bâtiments de bureaux climatisés à moins de 100 kWh/m²/an, Guide des solutions pratiques*.
- Dhaliwal AS, Goswami DY. (1984). *Heat transfer analysis environment control using an underground air tunnel*, ASME Solar Energy Div. Las Vegas pp 505–10.
- Diao N., Zeng H. Y., Fang Z. (2004). *Improvement in Modelling of Heat Transfer in Vertical Ground heat Exchangers*, HVAC&R RESEARCH.
- Dorer V., Breer D. (1998). *Residential mechanical ventilation systems: performance criteria and evaluations*. Energy and Buildings 27 pp 247-255.
- DTU 68.1 (1995). Conception et dimensionnement des installations de VMC.
- EDF (2007). Electricité De France. Site Web : <http://www.edf.fr>
- Effiziento (2007). Site Web : <http://www.effiziento.de/>
- El Khoury Z., Riederer P., Couillaud N., Simon J., Raguin M. (2005). *A multizone building model for MATLAB/SIMULINK environment*, Building Simulation 2005, Montréal Canada.
- Energie+ (2006). *ENERGIE + (version 5) : Conception et rénovation énergétique des bâtiments tertiaires*. Ministère de la Région wallonne, Division de l'énergie.
- ENERTECH (2005). *Technologies de l'information et éclairage – Campagne de mesure dans 49 ensembles de bureaux de la région PACA*.
- EPBD (2002). EPBD Buildings Platform <http://www.buildingsplatform.org/>
- ESP-r (2006). <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm> Site Web : <http://www.esru.strath.ac.uk>
- Faigle B. (2005). *Energon: 6000m² passive office building in Ulm, Germany*. Proceedings Passiefhuis – Symposium, Belgium.

- Filifli S. (2007). *Optimisation bâtiment / système pour minimiser les consommations dus à la climatisation*. Thèse de doctorat, Ecole de mines de Paris.
- France AIR (2007). Site Web : <http://www.france-air.com>
- Galasiu A. D., Veitch J. A. (2006). *Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review*. Energy and Buildings, Volume 38, Issue 7, July 2006, pp 728-742
- Gauthier C., Lacroix M., Bernier H. (1997). *Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses*, Solar Energy, Volume 60, pp 333-346.
- Ghosal M.K., Tiwari G.N., Srivastava N.S.L. (2004). *Thermal modelling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation*. Energy and Buildings, volume 36, pp 219–227.
- Gnielinski V. (1976). *New equation for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow*, Int. Chem. Eng. 16 pp 359–68.
- Goupy J. (2000). *Modélisation par les plans d'expériences*. Techniques de l'Ingénieur, R275.
- Goupy J. (1999). *Plan d'expériences pour surfaces de réponses*. Dunod.
- Grenelle (2007). *Le grenelle de l'environnement*, Site Web : <http://www.legrenelle-environnement.fr/>
- Hagentoft C. E. (2001). *Introduction to Building Physics*. Studentlitteratur.
- Hellstrom G. (1991). *Ground heat storage, Thermal analysis of duct storage systems*. Doctoral Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Lund, Sweden.
- Helios (2007). Site Web : <http://www.helios-fr.com/>
- Hip-Hip (2000). *House integrated photovoltaic high tech in public program*. Site Web : <http://www.hip-hip.net>
- Hollmuller P., Lachal B. (2001). *Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects*, Energy and Buildings, volume 33, pp 509 – 518.
- HQE (2004) <http://www.assohqe.org/>
- Husaunndee A., Jandon M., Lambert A., Motte E., Todtli J., Visier J.C. (2001). *Integrated control of HVAC system, lighting and blinds in a building zone*, Clima2000, Naples, Italy.
- Husaunndee, A., Lahrech, R., Vaézi-Néjad, H., Visier J.C. (1997). *SIMBAD : A simulation toolbox for the design and test of HVAC control systems*, Proceedings of the 5th international IBPSA conference, Prague, CZECH REPUBLIC, Volume 2, pp 269-276.
- Jakob M., Madlener R. (2003). *Exploring Experience Curves for the Building Envelope: An Investigation for Switzerland for 1970-2020*. SAE Conference on “Applied Energy, Economics and Policy and Management of Energy Companies” - ETH Zurich.
- Jreijiry (2004). *Modélisation numérique des systèmes de ventilation hybride et développement de stratégies de contrôle associées pour les bâtiments résidentiels*, Thèse doctorat, Université de La Rochelle.

- Kummert, M., Andre, P. (1997). *Coupling TRNSYS to MATLAB for an application to building optimal control*, TRNSYS Meeting, 1997.
- Kusuda, T., Archenbach P.R. (1965). *Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States*, ASHRAE Transactions 71 part 1.
- Labs K., Cook J. (1989). *Passive cooling*, Cambridge Massachusetts, London, England.
- Lahrech, R., Gruber, P., Riederer, P., Tessier, P., Visier, J.C. (2001). *Simulation models for testing control systems for HVAC applications*, Proceedings of Building Simulation 2001, Rio de Janeiro, Brazil, 2001, Volume 1, pp 1225-1232.
- Maalouf C., Bourdoukan P., Wurtz E., Allard F. (2007). *Étude d'un système de rafraîchissement évaporatif par sorption couple à une installation solaire*. VIIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes (CIFQ), Montreal.
- MATLAB (2005). *MATLAB – The language of technical computing*. Version 7.1. MathWorks Inc., MA, USA.
- Mendes, N., Gustavo, H., Oliveira, C., Humberto, X. (2001). *Building thermal performance analysis by using MATLAB/SIMULINK*, Proceedings of Building Simulation 2001, Rio de Janeiro, Brazil, 2001, Volume 1, pp 473-481.
- Mihalakakou G, Santamouris M, Asimakopoulos D. Tselepidaki (1995). *Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications*, Solar Energy, Volume 55 pp163–73.
- Mihalakakou G., Santamouris M., Asimakopoulos D. (1994). *Modelling the thermal performance of Earth-to-air heat exchangers*, Solar Energy, Volume 53, pp 301-305.
- Minergie (2007). Site Web : <http://www.minergie.ch/fr/>
- Morisot O., Marchio D. (2002a). *RELIQ : Groupe Frigorifique de production d'eau glacée à condensation à air ou à eau: modélisation simplifiée dans l'optique d'un calcul des consommations d'énergie d'une installation de climatisation dans un bâtiment tertiaire*, Ecole des Mines de PARIS, Centre d'Energétique.
- Morisot O., Roujol S., Marchio D. (2002b). *URBE : Unité Réversible sur Boucle d'Eau: modélisation simplifiée dans l'optique d'un calcul des consommations d'énergie d'une installation de climatisation dans un bâtiment tertiaire*, Ecole des Mines de PARIS, Centre d'Energétique.
- Nardot J.B. (2006). *Bâtiments à faible consommation*. Rapport de stage, CSTB - IUT MARNE LA VALLEE.
- Neymark J., Judkoff R. (2004). *Proposed IEA BESTEST Multi-Zone Conduction Cases*, Golden, Colorado, U.S.: National Renewable Energy Laboratory, Draft.
- Neymark J. (2004). *IEA BESTEST Multi-Zone Review*, Presented at IEA 34/43 Experts Third Meeting, October 6-8, 2004, Prague, Czech Republic. Golden, Colorado, U.S.: J. Neymark & Associates under contract with National Renewable Energy Laboratory.
- NF E 51-732 (2005). *Composants de ventilation mécanique contrôlée. Entrées d'air en façade*, AFNOR.
- NF EN 15242 (2005). *Systèmes de ventilation pour les bâtiments – Méthodes de calcul pour la détermination des débits d'air dans les bâtiments y compris l'infiltration*, AFNOR.

- NF EN ISO 7730 (2006). *Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*. AFNOR.
- Paassen, A.H.C., Liem, S.H, Gröninger B.P. (1998). *Ventilation and cooling control of night cooling with natural ventilation. Sensitivity analysis of control strategies and vent openings*, Proceedings of the 19th Annual AIVC Conference, Oslo, Norway, Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK, pp 438-447.
- Paepe M.DE, Janssens A. (2003). *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers*, Energy and buildings, Volume 35, pp 389-397.
- Parka C., Augenbroea G., Sadeghb N., Thitisawata M., Messadic T. (2004). *Real-time optimization of a double-skin façade based on lumped modeling and occupant preference*. Building and Environment, Volume 39, pp 939 – 948.
- Passivhaus (2007). Site Web: <http://www.passiv.de>
- Passiefhuis (2007). Site Web: <http://www.passiefhuisplatform.be>
- Pech I. (2002). *Elaboration d'un guide pour l'implémentation de modèles dans la bibliothèque SIMBAD. Application au capteur solaire*, Rapport de stage, CSTB – ISUPFERE.
- Perers B., Bales C. (2002). *A solar collector model for TRNSYS simulation and system testing*, A report of IEA SHC – Task 26, Solar Combisystems.
- Perers B. (1993). *Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation programs*, Solar Energy, Volume 50, Issue 6, pp 517-526.
- Permasteelisa (2007). Site Web : <http://www.permasteelisa.com/>
- Pfafferott J., Sebastian H., Wambsganß M. (2004). *Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation*. Energy and Buildings, Volume 36, pp 455–465.
- Pillet M. (1999). *Les plans d'expérience par la méthode de Taguchi*. Les Editions d'Organisation.
- Plan Climat (2004). <http://www.ecologie.gouv.fr>
- Riederer, P., Bruyat, F., Husaunndee, A., Vaezi-Néjad, H. (2001a). *HVAC Control systems in virtual laboratories*, Conférence IBPSA, Rio de Janeiro, p 881-887.
- Riederer, P., Marchio, D., Visier, J.C., Husaunndee, A., Lahrech, R. (2001b). *Influence of sensor position in building thermal control: Development and validation of an adapted zone model*, BS2001, Rio de Janeiro, Brazil, Volume 1, pp 449-456.
- Réglementation thermique (2005). *Guide réglementaire 2005*, CSTB.
- Roujol S., Marchio D. (2002). *Utilitaire de détermination des caractéristiques des groupes frigorifiques fonctionnant en pompe à chaleur*, Ecole des Mines de PARIS, Centre d'Energétique.
- Schijndel A., Wit M. (2003). *Advanced simulation of building systems and control with simulink*, Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands.

- Schweitzer K. (2005). *Wagner & Co, first passive office building. Proceedings Passiefhuis – Symposium, Belgium.*
- Shingari BK. (1995). *Earth tube heat exchanger*, Poultry International 34.
- SIMBAD (2001). *SIMBAD Building and HVAC toolbox*, Version 3.1.0 (2001). CSTB, France.
- SIMULINK (2005). *Dynamic System Simulation for MATLAB*, Version 6.3, Mathworks Inc., Ma., USA.
- SIA 380/1 (2001). *L'énergie thermique dans le bâtiment*, Norme Suisse.
- Souvay P. (2002). *Plans d'expériences - Méthode Taguchi*. AFNOR.
- Sorensen, B.R. (2002). *Applications and Energy Consumption of Demand controlled Ventilation Systems. Modelling, Simulation and Implementation of Modular Built Dynamical VAV Systems and Control Strategies*, PhD thesis, NTNU Trondheim Tr, 2002, 282 p.
- SolarBau (2000). Site Web: <http://www.solarbau.de>
- Stabat P., Morisot O., Marchio D. (2002). *Utilitaire de détermination des caractéristiques des groupes frigorifiques, unités réversibles*, Ecole des Mines de PARIS, Centre d'Energétique.
- TRNSYS 16 (2005). *A Transient System Simulation Program*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison, USA.
- Tzaferis A., Liparakis D., Santamouris M., Argiriou A. (1992). *Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers*, Energy and Buildings, volume 18, pp 35-43.
- Vaézi-Nejad et al (2000). *Projet QUALISIM: QUALité Assistée par la SIMulation – Définition du Cahier des charges et réalisation d'une première version d'un laboratoire virtuel*, CSTB, Marne-la-Vallée, 17 p.
- Vigier M. G. (1988). *Pratiques des plans d'expériences, méthodologie Taguchi*. Les éditions d'organisation.
- Vitte T., Brau J., Chatagnon N. (2007). *Etude d'un système de rafraîchissement évaporatif par sorption couple à une installation solaire*. VIIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes (CIFQ), Montreal.
- WINDOW5 (2005). *WINDOW5.0 computer program for analyzing window thermal performance. Windows & Daylighting Group, Building Technologies Program*. Environmental Energy Technologies Department, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Feist W., Schnieders J, Dorer V., Haas A. (2005). *Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept*. Energy and Buildings, Volume 37, pp 1186–1203.

Annexes

Annexe A1 : Caractéristiques de l'installation de climatisation de la configuration de référence

Caractéristiques des unités terminales : Le Tableau A1.1 donne les caractéristiques des unités terminales de type ventilo-convecteurs 2 tubes - 2 fils pour le climat de Nancy. Le dimensionnement des unités terminales est effectué à partir des puissances maximales de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment de référence. Les caractéristiques des unités terminales pour le climat d'Agén et de Nice sont présentées respectivement dans les Tableau A1.2 et Tableau A1.3. Ces caractéristiques sont issues des catalogues de la société France AIR.

		Puissance sensible				Ventilo-convecteurs						
		Rafraîchissement		Chauffage		Ventilateur		Rafraîchissement		Chauffage		
		P _{max} (kW)	P _{moy} (kW)	P _{max} (kW)	P _{moy} (kW)	P _{min} (W)	P _{moy} (W)	P _{max} (W)	P _{totale} (kW)	P _{sensible} (kW)	P _{chaud} (kW)	P _{elec} (kW)
RDC	Zone1	3,83	1,18	4,05	2,07	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,20
	Zone2	2,58	0,79	2,47	1,26	65,00	80,00	95,00	4,60	3,80	5,20	1,20
	Zone3	3,02	1,19	6,23	3,17	120,00	145,00	180,00	6,60	5,50	7,90	1,20
	Zone4	0,07	0,03	0,89	0,47	25,00	35,00	47,00	1,80	1,48	2,05	1,20
	Zone5	3,08	1,14	3,76	1,79	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,20
Etagé 1	Zone1	3,87	1,22	4,10	2,05	120,00	145,00	180,00	6,60	5,50	7,90	1,20
	Zone2	3,80	1,12	3,58	1,80	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,20
	Zone3	2,96	1,20	6,59	3,27	120,00	145,00	180,00	6,60	5,50	7,90	1,20
	Zone4	0,09	0,05	0,90	0,48	25,00	35,00	47,00	1,80	1,48	2,05	1,20
	Zone5	1,83	0,84	3,08	1,43	60,00	80,00	87,00	3,90	3,10	4,35	1,20
Etagé 2	Zone1	3,48	1,14	4,38	2,26	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,20
	Zone2	3,49	1,17	5,53	2,77	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,20
	Zone3	2,59	0,93	6,36	3,22	120,00	145,00	180,00	6,60	5,50	7,90	1,20
	Zone4	0,12	0,06	0,80	0,42	25,00	35,00	47,00	1,80	1,48	2,05	1,20
	Zone5	1,80	0,82	2,15	1,08	45,00	50,00	60,00	2,80	2,35	3,10	1,20

Tableau A1.1 : Caractéristiques des unités terminales de type ventilo-convecteurs pour Nancy

		Puissance sensible				Ventilo-convecteurs						
		Rafraîchissement		Chauffage		Ventilateur		Rafraîchissement		Chauffage		
		P _{max} (kW)	P _{moy} (kW)	P _{max} (kW)	P _{moy} (kW)	P _{min} (W)	P _{moy} (W)	P _{max} (W)	P _{totale} (kW)	P _{sensible} (kW)	P _{chaud} (kW)	P _{elec} (kW)
RDC	Zone1	3,32	1,34	3,87	1,66	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,00
	Zone2	2,40	0,91	2,33	1,02	60,00	80,00	87,00	3,90	3,10	4,35	1,00
	Zone3	3,62	1,25	5,80	2,73	120,00	145,00	180,00	6,60	5,50	7,90	1,00
	Zone4	0,12	0,04	0,88	0,41	25,00	35,00	47,00	1,80	1,48	2,05	1,00
	Zone5	2,73	1,25	3,46	1,56	65,00	80,00	95,00	4,60	3,80	5,20	1,00
Etage 1	Zone1	3,34	1,38	3,84	1,67	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,00
	Zone2	3,32	1,31	3,41	1,45	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,00
	Zone3	3,70	1,16	5,88	2,90	120,00	145,00	180,00	6,60	5,50	7,90	1,00
	Zone4	0,12	0,05	0,89	0,42	25,00	35,00	47,00	1,80	1,48	2,05	1,00
	Zone5	1,59	0,89	2,97	1,29	60,00	80,00	87,00	3,90	3,10	4,35	1,00
Etage 2	Zone1	3,10	1,18	4,29	1,83	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,00
	Zone2	3,32	1,18	5,48	2,19	65,00	85,00	130,00	5,70	4,80	6,60	1,00
	Zone3	3,24	1,00	6,10	2,89	120,00	145,00	180,00	6,60	5,50	7,90	1,00
	Zone4	0,17	0,05	0,76	0,38	25,00	35,00	47,00	1,80	1,48	2,05	1,00
	Zone5	1,53	0,88	2,08	0,89	45,00	50,00	60,00	2,80	2,35	3,10	1,00

Tableau A1.2 : Caractéristiques des unités terminales de type ventilo-convecteurs pour Agén

		Puissance sensible				Ventilo-convecteurs						
		Rafraîchissement		Chauffage		Ventilateur		Rafraîchissement		Chauffage		
		P _{max} (kW)	P _{moy} (kW)	P _{max} (kW)	P _{moy} (kW)	P _{min} (W)	P _{moy} (W)	P _{max} (W)	P _{totale} (kW)	P _{sensible} (kW)	P _{chaud} (kW)	P _{elec} (kW)
RDC	Zone1	3,55	1,56	3,20	1,46	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	6,60	0,60
	Zone2	2,48	0,98	1,91	0,90	60,00	80,00	87,00	3,90	4,35	4,35	0,60
	Zone3	3,41	1,46	4,94	2,53	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	7,90	0,60
	Zone4	0,20	0,07	0,85	0,37	25,00	35,00	47,00	1,80	2,05	2,05	0,60
	Zone5	3,01	1,46	3,05	1,16	65,00	80,00	95,00	4,60	5,20	5,20	0,60
Etage 1	Zone1	3,54	1,58	3,25	1,45	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	6,60	0,60
	Zone2	3,46	1,42	2,76	1,26	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	5,20	0,60
	Zone3	3,27	1,32	4,90	2,64	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	7,90	0,60
	Zone4	0,17	0,08	0,86	0,41	25,00	35,00	47,00	1,80	2,05	2,05	0,60
	Zone5	1,89	1,01	3,00	1,05	45,00	50,00	60,00	2,80	3,10	5,20	0,60
Etage 2	Zone1	3,30	1,40	3,58	1,65	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	5,20	0,60
	Zone2	3,57	1,34	4,57	1,79	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	6,60	0,60
	Zone3	3,06	1,27	5,14	2,64	65,00	85,00	130,00	5,70	6,60	7,90	0,60
	Zone4	0,18	0,08	0,71	0,37	25,00	35,00	47,00	1,80	2,05	2,05	0,60
	Zone5	1,77	0,95	2,13	0,87	45,00	50,00	60,00	2,80	3,10	4,35	0,60

Tableau A1.3 : Caractéristiques des unités terminales de type ventilo-convecteurs pour Nice

Caractéristiques de l'installation de pompe à chaleur : Le dimensionnement de la pompe à chaleur réversible pour le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment est effectué à partir des puissances de chauffage et de rafraîchissement maximales requises pour le bâtiment de référence. Le Tableau A1.4 donne les puissances maximales de chauffage et de rafraîchissement requises pour le bâtiment de référence.

Zone climatique	P _{max} – chauffage (kW)	P _{max} – rafraîchissement (kW)
Nancy	53,5	36,3
Agen	52,0	35,1
Nice	44,6	35,7

Tableau A1.4 : Puissances maximales requises pour le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment de référence pour Nancy, Agen et Nice

Les performances nominales de la pompe à chaleur retenue pour les climats de Nancy, Agen et Nice sont données dans le Tableau A1.5. Les caractéristiques de la pompe à chaleur sont issues des catalogues de la société Carrier.

Zone climatique	Nom de modèle	Mode chauffage		Mode rafraîchissement	
		P _{calorifique} (kW)	COP (-)	P _{frigorifique} (kW)	EER (-)
Nancy	AQUASNAP 30RH - 60	58,00	2,70	54,00	2,56
Agen	AQUASNAP 30RH - 60	58,00	2,70	54,00	2,56
Nice	AQUASNAP 30RH - 50	47,30	2,60	44,50	2,50

Tableau A1.5 : Caractéristiques de la pompe à chaleur pour Nancy, Agen et Nice

Les deux pompes à chaleur disposent d'un module hydraulique intégré. Sur la Figure A1.1 est portée la caractéristique débit - pression du module hydraulique.

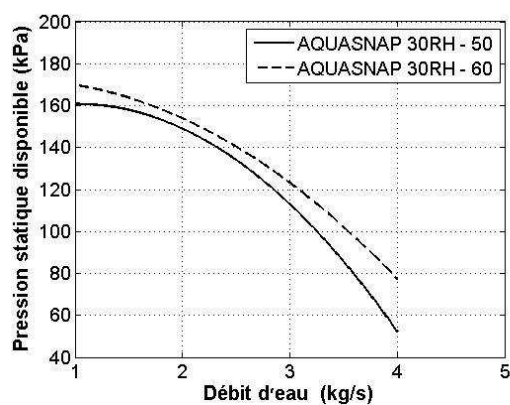


Figure A1.1 : Courbes débit – pression du module hydraulique des pompes à chaleur

Le Tableau A1.6 donne les valeurs de débit massique total d'eau dans le réseau hydraulique de l'installation pour le mode chauffage et le mode rafraîchissement.

Zone climatique	Débit d'eau – chauffage	Débit d'eau – rafraîchissement
	(kg/s)	(kg/s)
Nancy	2,00	3,44
Agen	1,92	3,31
Nice	1,83	3,18

Tableau A1.6 : Débit massique total d'eau dans le réseau hydraulique pour Nancy, Agen et Nice

Annexe A2 : Exemple d'application des tables de Taguchi

La méthode de Taguchi est fondée sur une représentation graphique du modèle que l'on souhaite identifier. Dans cette représentation les facteurs sont représentés par des ronds. Lorsqu'on réalise une expérience, tous les facteurs ne sont pas aussi faciles à modifier. Pour répondre à cette préoccupation, Taguchi distingue parmi les facteurs, quatre groupes qui seront présentés de façons différentes :

- Le groupe 1 sera le groupe des facteurs les plus difficiles à modifier. Ils sont notés par un cercle .
- Le groupe 2 sera un peu plus facile à modifier. Il sera noté par deux cercles concentriques .
- Le groupe 3 sera encore plus facile. Il sera noté par un cercle entourant un rond noir .
- Le groupe 4 sera constitué des facteurs les plus faciles à modifier, ils seront notés par un rond noir .

Les interactions entre deux facteurs seront symbolisées par un trait entre deux facteurs. La Figure A2.1 présente une interaction entre un facteur A du groupe 1 et un facteur B du groupe 4.

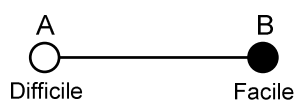


Figure A2.1 : Représentation graphique d'une interaction

Prenons l'exemple du modèle suivant (voir Tableau A2.1) :

$$Y \sim M + A + B + C + D + E + F + G + AB + AC + BC + AD + AE.$$

Facteurs	A	B	C	D	E	F	G
Niveaux	2	2	2	2	2	2	2
Groupes	1	2	3	4	4	4	4

Tableau A2.1 : Groupes et niveaux des facteurs

La Figure A2.2 donne le graphe du modèle établi selon les règles de représentation que nous venons de citer.

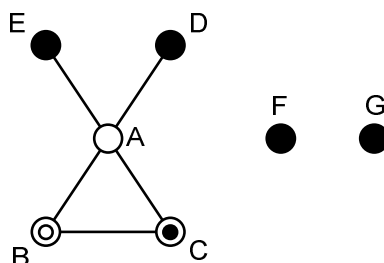


Figure A2.2 : Représentation graphique d'un modèle

Les facteurs étant tous des facteurs à 2 niveaux, nous recherchons le plan à partir des tables $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{16}(2^{15})$, $L_{32}(2^{31})$, $L_{64}(2^{63})$. Le choix de la table adaptée au modèle, est effectué à travers la vérification des critères du nombre de degrés de liberté et d'orthogonalité :

- Critère du nombre de degrés de liberté : Le nombre de degrés de liberté d'un modèle indique le nombre de valeurs qu'il est nécessaire de calculer pour connaître l'ensemble des coefficients du modèle. Pour identifier une droite d'équation $Y = aX + b$, il faut au moins deux essais car il a deux coefficients à identifier (a et b). Considérons le modèle de la Figure A2.2 :

$$Y \sim M + A + B + C + D + E + F + G + AB + AC + BC + AD + AE$$

$$\text{ddl} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1$$

Le nombre de degrés de liberté du modèle est de 13, le nombre d'expériences doit donc être supérieur ou égal à 13.

- Critère d'orthogonalité : Le critère d'orthogonalité permet de réduire les incertitudes sur le calcul des coefficients du modèle. Deux actions disjointes, c'est-à-dire ne comportant pas de facteurs en commun, sont orthogonales si à chaque niveau de l'une, tous les niveaux de l'autre sont associés le même nombre de fois dans le plan d'expériences. Un plan d'expériences est orthogonal vis-à-vis d'un modèle, si toutes les actions disjointes sont orthogonales dans le plan d'expériences.

On peut établir une condition nécessaire mais non suffisante pour trouver un plan susceptible d'être orthogonal vis-à-vis d'un modèle : un plan devra être le Plus Petit Multiple Commun (PPCM) du produit du nombre de niveaux de toutes les actions disjointes prises deux à deux. Le calcul du PPCM d'un modèle peut être effectué à l'aide du tableau de calcul de PPCM (voir Tableau A2.2).

A	2	*											
B	2	2 ²	*										
C	2	2 ²	2 ²	*									
D	2	2 ²	2 ²	2 ²	*								
E	2	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²	*							
F	2	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²	*						
G	2	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²	*					
AB	2 ²	*	*	2 ³	2 ³	2 ³	2 ³	2 ³	*				
AC	2 ²	*	2 ³	*	2 ³	2 ³	2 ³	2 ³	2 ⁴	*			
BC	2 ²	2 ³	*	*	2 ³	2 ³	2 ³	2 ³	2 ⁴	2 ⁴	*		
AD	2 ²	2 ³	2 ³	2 ³	*	2 ³	2 ³	2 ³	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	*	
AE	2 ²	2 ³	2 ³	2 ³	2 ³	*	2 ³	2 ³	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	*
	2	2	2	2	2	2	2	2	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²	2 ²
	A	B	C	D	E	F	G	AB	AC	BC	AD	AE	

Tableau A2.2 : Calcul du PPCM

Pour construire ce tableau, il faut :

- placer chaque action intervenant dans le modèle en lignes et en colonnes avec son nombre de niveaux décomposé en un nombre premier (l'interaction BC à 4 niveaux a été décomposée en 2x2) ;
- placer une étoile (*) à chaque intersection d'action jointes ;
- calculer le produit des nombres de niveaux à chaque intersection entre deux actions, le produit étant noté sous la forme de sa décomposition en un nombre premier.

A partir de ce tableau, le PPCM apparaît immédiatement. Il suffit de trouver le produit de tous les nombres premiers intervenant dans le tableau, pris à leur puissance la plus élevée. Ainsi, dans ce cas le PPCM est égal à $2^4 = 16$.

Comme condition sur le plan d'expériences, nous avons trouvé que celui-ci devait avoir un nombre de ligne (nombre d'essais) égal ou multiple de 16 (Table L₁₆, L₃₂ ou L₆₄).

Considérons la table L_{16} . Pour affecter une colonne à chaque facteur, il faut trouver un graphe linéaire proposé par Taguchi qui se superpose au graphe linéaire du modèle qu'on souhaite identifier. Pour la table L_{16} l'ASI (American Supplier Institute) a publié 18 graphes linéaires. Nous devons donc rechercher parmi ceux qui conviendraient le mieux à notre problème. Considérons le graphe suivant et comparons-le à celui de notre modèle (voir Figure A2.3) (Pillet, 1999).

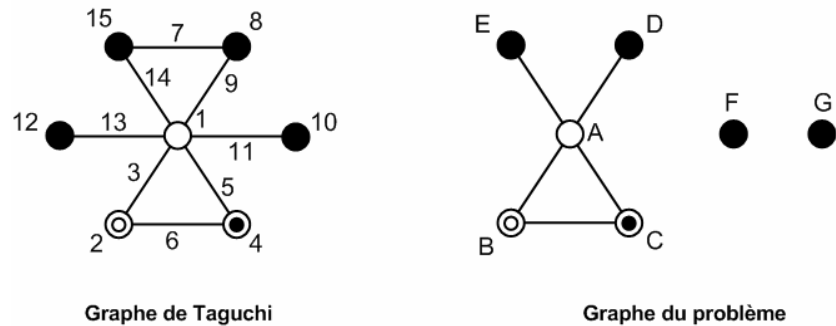


Figure A2.3 : Graphes du problème et de Taguchi

On constate que le graphe du modèle est un sous-ensemble du graphe de Taguchi, nous pouvons donc l'utiliser pour affecter les colonnes à chaque coefficient (voir Tableau A2.3).

Facteurs	A	B	C	D	E	F	G
Colonnes	1	2	4	8	15	10	12

Tableau A2.3 : Choix des colonnes

Supposons néanmoins qu'on utilise le plan que nous venons de bâtir. Le plan d'expériences s'écrit facilement en utilisant de la table L_{16} présentée (voir Tableau A2.4).

Colonnes Facteurs	1 A	2 B	4 C	8 D	15 E	10 F	12 G	Réponse Y
01	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	35,6
02	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	30,4
03	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	33,5
04	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	39,5
05	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	12,6
06	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	34,5
07	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	26,5
08	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	36,4
09	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	33,5
10	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	23,4
11	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	35,6
12	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	21,5
13	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	26,6
14	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	20,4
15	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	28,4
16	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	34,5

Tableau A2.4 : Choix des colonnes pour chaque facteur

Le modèle polynômial de ce plan est :

$$Y \sim 29,55 + (-1,56).A + (-2,06).B + (2,43).C + (0,518).D + (-2,46).E + (-3,44).F + (-0,468).G + (1,55).AB + (-0,418).AC + (1,53).BC + (-3,55).AD + (0,431).AE$$

Afin d'identifier les actions aliassées, on établit le tableau de recherche des interactions (voir Tableau A2.5) à partir du triangle des interactions fourni avec la table L_{16} (voir Tableau A2.6).

AB	3	AC	5	AD	9	AE	14	AF	11	AG	13
BC	6	BD	10	BE	13	BF	8	BG	14		
CD	12	CE	11	CF	14	CG	8				
DE	7	DF	2	DG	4						
EF	5	EG	3								
FG	6										

Tableau A2.5 : Tableau de recherche des interactions

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
(1)	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14
(2)		1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
(3)			7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
(4)				1	2	3	12	13	14	15	8	19	10	11
(5)					3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
(6)						1	14	15	12	13	10	11	8	9
(7)							15	14	13	12	11	10	9	8
(8)								1	2	3	4	5	6	7
(9)									3	2	5	4	7	6
(10)										1	6	7	4	5
(11)											7	6	5	4
(12)												1	2	3
(13)													3	2
(14)														1

Tableau A2.6 : Triangle des interactions (Pillet, 1999)

Le triangle des interactions indique quelle sera la colonne qui sera alias des interactions. Pour savoir par exemple dans quelle colonne se situe l'interaction DF, il suffit de lire le chiffre situé à l'interaction entre la ligne (8) (colonne où se situe le facteur D) et la colonne 10 (colonne où se situe le facteur F), soit 2. Or, la colonne 2 correspond au facteur B. B et DF seront donc aliassées.

On établit ensuite le tableau d'Alias (voir Tableau A2.7). Dans ce plan d'expériences, seuls les A, de E et AD ne seront alias d'aucune action d'ordre inférieur au troisième. Le facteur D sera même alias de deux interactions de second ordre.

Action du modèle	Colonne	Alias
A	1	
B	2	DF
C	4	DG
D	8	BF+CG
E	15	
F	10	BD
G	12	CD
AB	3	EG
AC	5	EF
BC	6	FG
AD	9	
AE	14	CF+BG

Tableau A2.7 : Tableau des Alias

Annexe A3 : Table $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
5	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	
6	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	
7	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	
9	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	
10	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	
11	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	
12	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	
13	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	
14	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
16	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	
17	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	
18	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
19	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
20	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	
21	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	
22	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
23	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
24	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	
25	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	
26	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	
27	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	
28	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	
29	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	
30	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	
31	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	
32	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	

Tableau A3.1 : Table $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi (ASI, 1987)

Annexe A4 : Table $L_{64}(2^{63})$ de Taguchi

[illegible]

Tableau A4.1 : Table $L_{64}(2^{63})$ de Taguchi (ASI, 1987)

Annexe A5 : Table $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		
6	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0		
7	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1		
9	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		
10	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	
11	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	
12	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	
13	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	
14	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	
15	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	-1	
16	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	
17	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	
18	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	
19	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	0		
20	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1		
21	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1		
22	-1	1	1	1	0	0	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1		
23	-1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	
24	-1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	1	1	1	
25	-1	1	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	
26	-1	1	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	-1	-1	
27	-1	1	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0		
28	0	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	
29	0	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	
30	0	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	
31	0	-1	0	1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	
32	0	-1	0	1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
33	0	-1	0	1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
34	0	-1	0	1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0
35	0	-1	0	1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
36	0	-1	0	1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
37	0	0	1	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	
38	0	0	1	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	0	1	-1	1	-1	0	-1	1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	1	-1	
39	0	0	1	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	-1	0	-1	1	-1	0	-1	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	1	-1	
40	0	0	1	-1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	1	-1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	0	1	0	1	-1	
41	0	0	1	-1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	1	-1	0	1	-1	0	-1	1	-1	0	1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	1	
42	0	0	1	-1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	1	-1	0	-1	0	1	-1	0	-1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	
43	0	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	
44	0	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	-1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	
45	0	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0
46	0	1	-1	0	-1	0	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	0	0	1	-1	
47	0	1	-1	0	-1	0	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0	0	1	1	-1	
48	0	1	-1	0	-1	0	1	1	-1																																	

Tableau A5.1 : Table $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi (ASI, 1987)

Annexe A6 : Plan de Box-Behnken pour 11 facteurs

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	1
2	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	1	0	-1
3	0	0	-1	0	0	0	-1	1	-1	0	-1
4	0	0	-1	0	0	0	-1	1	1	0	1
5	0	0	-1	0	0	0	1	-1	-1	0	-1
6	0	0	-1	0	0	0	1	-1	1	0	1
7	0	0	-1	0	0	0	1	1	-1	0	1
8	0	0	-1	0	0	0	1	1	1	0	-1
9	0	0	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	-1
10	0	0	1	0	0	0	-1	-1	1	0	1
11	0	0	1	0	0	0	-1	1	-1	0	1
12	0	0	1	0	0	0	-1	1	1	0	-1
13	0	0	1	0	0	0	1	-1	-1	0	1
14	0	0	1	0	0	0	1	-1	1	0	-1
15	0	0	1	0	0	0	1	1	-1	0	-1
16	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
17	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	1	0
18	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	1	-1	0
19	-1	0	0	-1	0	0	0	1	-1	-1	0
20	-1	0	0	-1	0	0	0	1	1	1	0
21	-1	0	0	1	0	0	0	-1	-1	-1	0
22	-1	0	0	1	0	0	0	-1	1	1	0
23	-1	0	0	1	0	0	0	1	-1	1	0
24	-1	0	0	1	0	0	0	1	1	-1	0
25	1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0
26	1	0	0	-1	0	0	0	-1	1	1	0
27	1	0	0	-1	0	0	0	1	-1	1	0
28	1	0	0	-1	0	0	0	1	1	-1	0
29	1	0	0	1	0	0	0	-1	-1	1	0
30	1	0	0	1	0	0	0	-1	1	-1	0
31	1	0	0	1	0	0	0	1	-1	-1	0
32	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
33	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	1
34	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	1	-1
35	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	-1	-1
36	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	1	1
37	0	-1	0	0	1	0	0	0	-1	-1	-1
38	0	-1	0	0	1	0	0	0	-1	1	1
39	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	-1	1
40	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	1	-1
41	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1
42	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1	1	1
43	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	-1	1
44	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	1	-1
45	0	1	0	0	1	0	0	0	-1	-1	1
46	0	1	0	0	1	0	0	0	-1	1	-1
47	0	1	0	0	1	0	0	0	1	-1	-1
48	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
49	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	1
50	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	-1
51	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	-1	-1
52	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	1
53	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1
54	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	1
55	-1	0	1	0	0	1	0	0	0	-1	1
56	-1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	-1
57	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	-1
58	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1	1
59	1	0	-1	0	0	1	0	0	0	-1	1
60	1	0	-1	0	0	1	0	0	0	1	-1
61	1	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1	1
62	1	0	1	0	0	-1	0	0	0	1	-1
63	1	0	1	0	0	1	0	0	0	-1	-1
64	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
65	-1	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1
66	-1	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	-1
67	-1	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1
68	-1	-1	0	1	0	0	1	0	0	0	1
69	-1	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1
70	-1	1	0	-1	0	0	1	0	0	0	1
71	-1	1	0	1	0	0	-1	0	0	0	1
72	-1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	-1
73	1	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1
74	1	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0	1
75	1	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0	1
76	1	-1	0	1	0	0	1	0	0	0	-1
77	1	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	1
78	1	1	0	-1	0	0	1	0	0	0	-1
79	1	1	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1
80	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1
81	-1	-1	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0
82	-1	-1	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0
83	-1	-1	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0
84	-1	-1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
85	-1	1	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0
86	-1	1	-1	0	1	0	0	1	0	0	0
87	-1	1	1	0	-1	0	0	1	0	0	0
88	-1	1	1	0	1	0	0	-1	0	0	0
89	1	-1	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0
90	1	-1	-1	0	1	0	0	1	0	0	0
91	1	-1	1	0	-1	0	0	1	0	0	0
92	1	-1	1	0	1	0	0	-1	0	0	0
93	1	1	-1	0	-1	0	0	1	0	0	0
94	1	1	-1	0	1	0	0	-1	0	0	0

95	1	1	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0
96	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
97	0	-1	-1	-1	0	-1	0	0	1	0	0
98	0	-1	-1	-1	0	1	0	0	-1	0	0
99	0	-1	-1	1	0	-1	0	0	-1	0	0
100	0	-1	-1	1	0	1	0	0	1	0	0
101	0	-1	1	-1	0	-1	0	0	-1	0	0
102	0	-1	1	-1	0	1	0	0	1	0	0
103	0	-1	1	1	0	-1	0	0	1	0	0
104	0	-1	1	1	0	1	0	0	-1	0	0
105	0	1	-1	-1	0	-1	0	0	-1	0	0
106	0	1	-1	-1	0	1	0	0	1	0	0
107	0	1	-1	1	0	-1	0	0	1	0	0
108	0	1	-1	1	0	1	0	0	-1	0	0
109	0	1	1	-1	0	-1	0	0	1	0	0
110	0	1	1	-1	0	1	0	0	-1	0	0
111	0	1	1	1	0	-1	0	0	-1	0	0
112	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0
113	0	0	-1	-1	-1	0	-1	0	0	1	0
114	0	0	-1	-1	-1	0	1	0	0	-1	0
115	0	0	-1	-1	1	0	-1	0	0	-1	0
116	0	0	-1	-1	1	0	1	0	0	1	0
117	0	0	-1	1	-1	0	-1	0	0	-1	0
118	0	0	-1	1	-1	0	1	0	0	1	0
119	0	0	-1	1	1	0	-1	0	0	1	0
120	0	0	-1	1	1	0	1	0	0	-1	0
121	0	0	1	-1	-1	0	-1	0	0	-1	0
122	0	0	1	-1	-1	0	1	0	0	1	0
123	0	0	1	-1	1	0	-1	0	0	1	0
124	0	0	1	-1	1	0	1	0	0	-1	0
125	0	0	1	1	-1	0	-1	0	0	1	0
126	0	0	1	1	-1	0	1	0	0	-1	0
127	0	0	1	1	1	0	-1	0	0	-1	0
128	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
129	0	0	0	-1	-1	-1	0	-1	0	0	1
130	0	0	0	-1	-1	-1	0	1	0	0	-1
131	0	0	0	-1	-1	1	0	-1	0	0	-1
132	0	0	0	-1	-1	1	0	1	0	0	1
133	0	0	0	-1	1	-1	0	-1	0	0	-1
134	0	0	0	-1	1	-1	0	1	0	0	1
135	0	0	0	-1	1	1	0	-1	0	0	1
136	0	0	0	-1	1	1	0	1	0	0	-1
137	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0	0	-1
138	0	0	0	1	-1	-1	0	1	0	0	1
139	0	0	0	1	-1	1	0	-1	0	0	1
140	0	0	0	1	-1	1	0	1	0	0	-1
141	0	0	0	1	1	-1	0	-1	0	0	1
142	0	0	0	1	1	-1	0	1	0	0	-1
143	0	0	0	1	1	1	0	-1	0	0	-1
144	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
145	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	1	0	0
146	-1	0	0	0	-1	-1	1	0	-1	0	0
147	-1	0	0	0	-1	1	-1	0	-1	0	0
148	-1	0	0	0	-1	1	1	0	1	0	0
149	-1	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0	0
150	-1	0	0	0	1	-1	1	0	1	0	0
151	-1	0	0	0	1	1	-1	0	1	0	0
152	-1	0	0	0	1	1	1	0	-1	0	0
153	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	-1	0	0
154	1	0	0	0	-1	-1	1	0	1	0	0
155	1	0	0	0	-1	1	-1	0	1	0	0
156	1	0	0	0	-1	1	1	0	-1	0	0
157	1	0	0	0	1	-1	-1	0	1	0	0
158	1	0	0	0	1	-1	1	0	-1	0	0
159	1	0	0	0	1	1	-1	0	-1	0	0
160	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
161	0	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	1	0
162	0	-1	0	0	0	-1	-1	1	0	-1	0
163	0	-1	0	0	0	-1	1	-1	0	-1	0
164	0	-1	0	0	0	-1	1	1	0	1	0
165	0	-1	0	0	0	1	-1	-1	0	-1	0
166	0	-1	0	0	0	1	-1	1	0	1	0
167	0	-1	0	0	0	1	1	-1	0	1	0
168	0	-1	0	0	0	1	1	1	0	-1	0
169	0	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	-1	0
170	0	1	0	0	0	-1	-1	1	0	1	0
171	0	1	0	0	0	-1	1	-1	0	1	0
172	0	1	0	0	0	-1	1	1	0	-1	0
173	0	1	0	0	0	1	-1	-1	0	1	0
174	0	1	0	0	0	1	-1	1	0	-1	0
175	0	1	0	0	0	1	1	-1	0	-1	0
176	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
177	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
179	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
181	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
182	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
183	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
185	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
186	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
188	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau A6.1 : Plan de Box-Behnken pour 11 facteurs (MATLAB, 2005)

Annexe A7 : Plan D-optimaux pour 11 facteurs

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	0	1	1
3	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
5	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
6	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1
7	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
8	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	-1
9	-1	0	1	1	-1	1	1	-1	0	-1	1
10	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0
11	1	-1	0	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
12	-1	-1	1	-1	1	1	0	0	-1	-1	-1
13	-1	-1	1	1	1	0	0	-1	1	0	1
14	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1
15	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
16	1	-1	0	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
17	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18	-1	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	0	1
19	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1
20	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
21	-1	1	0	-1	-1	0	-1	1	0	-1	-1
22	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
23	0	-1	-1	-1	0	0	1	-1	1	1	-1
24	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
25	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1
26	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1
27	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
28	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
29	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1
30	0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
31	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
32	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	0	-1	-1
33	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
34	1	-1	1	1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1
35	0	1	1	-1	1	1	-1	-1	0	0	0
36	-1	1	1	0	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
37	-1	-1	1	1	-1	1	0	0	1	1	-1
38	-1	0	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
39	-1	1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	1	0
40	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
41	0	1	-1	1	0	1	-1	1	1	0	-1
42	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1
43	-1	-1	-1	0	0	-1	1	1	1	1	1
44	-1	-1	-1	1	-1	0	1	-1	-1	1	1
45	0	0	-1	1	1	0	1	-1	-1	-1	0
46	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
47	-1	0	1	1	0	0	-1	-1	-1	1	-1
48	0	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
49	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1
50	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
51	-1	-1	-1	1	0	-1	0	-1	0	-1	-1
52	1	-1	1	-1	1	1	1	0	1	1	1
53	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1
54	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
55	1	-1	-1	-1	1	1	0	-1	1	-1	1
56	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
57	-1	1	-1	1	-1	0	1	1	1	-1	1
58	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0
59	-1	0	0	0	1	1	1	-1	1	-1	-1
60	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	0	1	0	-1
61	-1	1	0	1	-1	1	1	-1	-1	0	-1
62	1	0	1	-1	-1	1	0	-1	1	1	-1
63	1	1	0	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
64	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
65	1	1	1	0	-1	0	1	0	0	1	-1
66	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	-1	-1	1
67	-1	1	-1	-1	0	-1	1	1	-1	-1	1
68	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0
69	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
70	1	1	1	0	-1	1	-1	1	1	-1	1
71	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
72	1	-1	-1	0	1	0	1	1	1	0	-1
73	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	0
74	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
75	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1
76	0	1	-1	-1	-1	1	-1	0	-1	-1	1
77	1	1	-1	1	0	-1	-1	-1	-1	0	1
78	1	-1	1	-1	0	-1	-1	0	-1	1	1
79	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	0
80	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1
81	0	0	0	0	1	1	0	1	-1	1	1

Tableau A7.1 : Plan D-optimaux pour 11 facteurs (MATLAB, 2005)

Annexe A8 : Plan D-optimaux pour 13 facteurs

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	-1	-1	0	-1	0	-1	0	1	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	1	1
6	-1	-1	1	1	0	1	0	1	-1	0	-1	-1	-1
7	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	0	1	1	1
8	-1	-1	0	0	1	0	1	0	-1	1	-1	-1	-1
9	0	0	1	1	1	1	1	1	0	-1	0	0	0
10	1	1	0	0	1	-1	0	-1	-1	0	0	0	-1
11	-1	-1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0
12	0	0	-1	-1	1	1	0	1	1	-1	-1	-1	1
13	-1	-1	0	0	-1	-1	1	-1	0	-1	1	1	0
14	0	0	1	1	-1	0	1	0	1	0	-1	-1	1
15	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	0	0	-1
16	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
17	1	1	1	1	0	0	-1	0	-1	-1	0	0	-1
18	-1	-1	-1	-1	0	1	-1	1	0	0	1	1	0
19	0	0	1	1	0	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1
20	1	1	-1	-1	0	0	1	0	0	-1	-1	-1	0
21	-1	-1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
22	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	0
23	-1	-1	-1	-1	1	0	-1	0	1	1	0	0	1
24	0	0	0	0	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
25	-1	-1	1	1	-1	-1	0	-1	1	-1	0	0	1
26	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	-1
27	1	1	0	0	-1	1	0	1	0	1	-1	-1	0
28	0	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	0	1	0	-1
29	1	0	0	1	1	1	1	0	-1	1	-1	1	0
30	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	0	-1	0	-1	1
31	1	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	1	0
32	-1	1	0	1	-1	1	-1	0	0	0	0	-1	1
33	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0	-1
34	-1	1	-1	0	0	0	0	-1	0	1	0	-1	1
35	0	-1	0	1	0	1	0	0	1	-1	1	0	-1
36	1	0	1	-1	0	-1	0	1	-1	0	-1	1	0
37	-1	1	0	1	0	0	-1	-1	1	1	-1	1	-1
38	0	-1	1	-1	0	1	-1	0	-1	-1	0	-1	0
39	1	0	-1	0	0	-1	1	1	0	0	1	0	1
40	0	-1	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0	-1	0
41	1	0	1	-1	1	1	0	0	0	1	1	0	1
42	-1	1	-1	0	1	-1	0	1	1	-1	-1	1	-1
43	1	0	0	1	-1	0	1	-1	0	-1	1	0	1
44	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	1	0	-1	1	-1
45	0	-1	-1	0	-1	-1	1	1	-1	1	0	-1	0
46	1	0	1	-1	-1	0	0	-1	1	-1	0	-1	-1
47	-1	1	-1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	0	0
48	0	-1	0	1	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	1
49	-1	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	1	1	0	0
50	0	-1	-1	0	0	1	1	0	0	-1	-1	1	1
51	1	0	0	1	0	-1	1	1	1	0	0	-1	-1
52	0	-1	1	-1	1	0	-1	-1	0	0	-1	1	1
53	1	0	-1	0	1	1	-1	0	1	1	0	-1	-1
54	-1	1	0	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	0	0
55	1	-1	-1	1	0	1	0	-1	0	1	0	1	-1
56	-1	0	0	-1	0	-1	0	0	1	-1	1	-1	0
57	0	1	1	0	0	0	0	1	-1	0	-1	0	1
58	-1	0	-1	1	1	1	1	-1	1	0	1	-1	0
59	0	1	0	-1	1	-1	1	0	-1	1	-1	0	1
60	1	-1	1	0	1	0	1	1	0	-1	0	1	-1
61	0	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0	1	1
62	1	-1	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	1	-1
63	-1	0	1	0	-1	0	-1	1	1	1	1	-1	0
64	0	1	0	-1	-1	1	1	-1	0	-1	1	-1	-1
65	1	-1	1	0	-1	-1	1	0	1	0	-1	0	0
66	-1	0	-1	1	-1	0	1	1	-1	1	0	1	1
67	1	-1	0	-1	0	1	-1	-1	1	1	-1	0	0
68	-1	0	1	0	0	-1	-1	0	-1	-1	0	1	1
69	0	1	-1	1	0	0	-1	1	0	0	1	-1	-1
70	-1	0	0	-1	1	1	0	-1	-1	0	0	1	1
71	0	1	1	0	1	-1	0	0	0	1	1	-1	-1
72	1	-1	-1	1	1	0	0	1	1	-1	-1	0	0
73	-1	0	1	0	1	1	-1	-1	0	0	-1	0	-1
74	0	1	-1	1	1	-1	-1	0	1	1	0	1	0
75	1	-1	0	-1	1	0	-1	1	-1	-1	1	-1	1
76	0	1	1	0	-1	1	0	-1	1	-1	0	1	0
77	1	-1	-1	1	-1	-1	0	0	-1	0	1	-1	1
78	-1	0	0	-1	-1	0	0	1	0	1	-1	0	-1
79	1	-1	1	0	0	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
80	-1	0	-1	1	0	-1	1	0	0	-1	-1	0	-1
81	0	1	0	-1	0	0	1	1	1	0	0	1	0

Tableau A8.1 : Plan D-optimaux pour 13 facteurs (MATLAB, 2005)

Annexe A9 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage

Nancy

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} = 71,6486 + (5,1248)*X_1 + (5,582)*X_2 + (25,8099)*X_3 + (-3,457)*X_4 + (8,9091)*X_5 + (-0,03967)*X_6 + (1,2307)*X_7 + (4,6982)*X_8 + (-3,0794)*X_9 + (-0,07261)*X_8.X_1 + (0,22868)*X_1.X_2 + (-0,65978)*X_1.X_5 + (0,28721)*X_1.X_3 + (0,28269)*X_3.X_2 + (5,1244)*X_3.X_5 + (-0,47572)*X_3.X_4 + (-0,25747)*X_5.X_4 + (-0,026821)*X_5.X_7 + (-0,32024)*X_4.X_7 \quad (A9.1)$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} = 71,6331 + (5,1499)*X_1 + (5,6184)*X_2 + (25,8248)*X_3 + (-3,5109)*X_4 + (8,8761)*X_5 + (-0,085552)*X_6 + (1,318)*X_7 + (4,6773)*X_8 + (-3,1245)*X_9 + (0,082359)*X_3.X_7 + (0,081591)*X_3.X_1 + (0,18774)*X_3.X_6 + (-0,15323)*X_3.X_9 + (0,18479)*X_3.X_8 + (5,0895)*X_3.X_5 + (-0,49849)*X_3.X_4 + (0,21765)*X_3.X_2 + (0,094722)*X_2.X_1 + (0,068013)*X_2.X_6 + (0,077068)*X_2.X_5 + (-0,1083)*X_2.X_4 + (0,15817)*X_4.X_7 + (-0,059202)*X_4.X_1 + (-0,38087)*X_4.X_6 + (0,1252)*X_4.X_9 + (-0,065214)*X_4.X_8 + (-0,46466)*X_4.X_5 + (0,15668)*X_5.X_7 + (-0,6893)*X_5.X_1 + (-0,38389)*X_5.X_6 + (0,02137)*X_5.X_9 + (0,015925)*X_8.X_7 + (0,06515)*X_8.X_6 + (0,017807)*X_8.X_9 + (-0,038664)*X_9.X_1 + (-0,17181)*X_9.X_6 + (0,18352)*X_6.X_7 + (0,15464)*X_6.X_1 + (0,023293)*X_1.X_7 \quad (A9.2)$$

• Plan de Box-Behnken

$$\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} = 70,0908 + (5,1083)*X_1 + (5,6079)*X_2 + (25,7149)*X_3 + (-3,6679)*X_4 + (8,8511)*X_5 + (-0,088919)*X_6 + (1,3842)*X_7 + (4,6747)*X_8 + (-3,1659)*X_9 + (0,070529)*X_1.X_2 + (0,12504)*X_1.X_3 + (-0,048171)*X_1.X_4 + (-0,7078)*X_1.X_5 + (0,17605)*X_1.X_6 + (0,0026196)*X_1.X_7 + (0,057211)*X_1.X_8 + (-0,0098015)*X_1.X_9 + (0,26187)*X_2.X_3 + (-0,09237)*X_2.X_4 + (0,037555)*X_2.X_5 + (0,041475)*X_2.X_6 + (0,025384)*X_2.X_7 + (0,015171)*X_2.X_8 + (-0,057192)*X_2.X_9 + (-0,51111)*X_3.X_4 + (5,0943)*X_3.X_5 + (0,19169)*X_3.X_6 + (0,14661)*X_3.X_7 + (0,19019)*X_3.X_8 + (-0,18914)*X_3.X_9 + (-0,48756)*X_4.X_5 + (-0,38236)*X_4.X_6 + (0,16152)*X_4.X_7 + (-0,058313)*X_4.X_8 + (0,11135)*X_4.X_9 + (-0,39249)*X_5.X_6 + (0,18357)*X_5.X_7 + (0,016471)*X_5.X_8 + (0,0084071)*X_5.X_9 + (0,22883)*X_6.X_7 + (0,068341)*X_6.X_8 + (-0,14397)*X_6.X_9 + (0,016432)*X_7.X_8 + (-0,046522)*X_7.X_9 + (-0,040983)*X_8.X_9 + (-0,14598)*X_1^2 + (0,0076618)*X_2^2 + (-0,83862)*X_3^2 + (0,19845)*X_4^2 + (0,1288)*X_5^2 + (1,661)*X_6^2 + (0,11524)*X_7^2 + (0,45429)*X_8^2 + (0,034244)*X_9^2 \quad (A9.3)$$

• Plan de couplage n^2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$

$$\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} = 70,1254 + (5,117)*X_1 + (5,593)*X_2 + (25,7316)*X_3 + (-3,6021)*X_4 + (8,8476)*X_5 + (-0,085618)*X_6 + (1,3669)*X_7 + (4,6724)*X_8 + (-3,162)*X_9 + (0,054492)*X_1.X_2 + (0,13218)*X_1.X_3 + (-0,062382)*X_1.X_4 + (-0,68245)*X_1.X_5 + (0,17188)*X_1.X_6 + (0,0088636)*X_1.X_7 + (0,045778)*X_1.X_8 + (-0,048269)*X_1.X_9 + (0,27459)*X_2.X_3 + (-0,10141)*X_2.X_4 + (0,038038)*X_2.X_5 + (0,06159)*X_2.X_6 + (0,031229)*X_2.X_7 + (0,0024946)*X_2.X_8 + (-0,057881)*X_2.X_9 + (-0,50838)*X_3.X_4 + (5,0927)*X_3.X_5 + (0,19386)*X_3.X_6 + (0,13974)*X_3.X_7 + (0,19078)*X_3.X_8 + (-0,186)*X_3.X_9 + (-0,49483)*X_4.X_5 + (-0,38317)*X_4.X_6 + (0,14751)*X_4.X_7 + (-0,069197)*X_4.X_8 + (0,12915)*X_4.X_9 + (-0,40648)*X_5.X_6 + (0,16782)*X_5.X_7 + (0,045198)*X_5.X_8 + (0,011809)*X_5.X_9 + (0,2526)*X_6.X_7 + (0,077461)*X_6.X_8 + (-0,1592)*X_6.X_9 + (0,016119)*X_7.X_8 + (-0,051483)*X_7.X_9 + (-0,045368)*X_8.X_9 + (-0,14579)*X_1.X_1 + (0,0010208)*X_2.X_2 + (-0,8582)*X_3.X_3 + (0,19709)*X_4.X_4 + (0,11348)*X_5.X_5 + (1,6467)*X_6.X_6 + (0,10213)*X_7.X_7 + (0,43593)*X_8.X_8 + (0,028664)*X_9.X_9 + (-0,059817)*X_1.X_2.X_3 + (-0,008404)*X_1.X_2.X_4 + (0,003896)*X_1.X_2.X_5 + (0,020231)*X_1.X_2.X_6 + (0,020853)*X_1.X_2.X_7 + (0,02284)*X_1.X_2.X_8 + (-0,057759)*X_1.X_2.X_9 + (0,073706)*X_1.X_3.X_4 + (0,0044744)*X_1.X_3.X_5 + (-0,014456)*X_1.X_3.X_6 + (0,0059115)*X_1.X_3.X_7 + (-0,030849)*X_1.X_3.X_8 + (-0,0011609)*X_1.X_3.X_9 + (0,019479)*X_1.X_4.X_5 + (0,0015765)*X_1.X_4.X_6 + (0,010434)*X_1.X_4.X_7 + (0,011106)*X_1.X_4.X_8 \quad (A9.4)$$

$$\begin{aligned}
& + (0.0041038)*X1.X4.X9 + (-0.017267)*X1.X5.X6 + (0.012402)*X1.X5.X7 + (-0.040439)*X1.X5.X8 \\
& + (-0.038176)*X1.X5.X9 + (-0.0051394)*X1.X6.X7 + (-0.037203)*X1.X6.X8 \\
& + (0.00032467)*X1.X6.X9 + (-0.031666)*X1.X7.X8 + (0.057278)*X1.X7.X9 \\
& + (0.015281)*X1.X8.X9 + (0.0035442)*X2.X3.X4 + (0.034453)*X2.X3.X5 + (- \\
& 0.0094568)*X2.X3.X6 + (0.035912)*X2.X3.X7 + (-0.046635)*X2.X3.X8 + (-0.021779)*X2.X3.X9 \\
& + (-0.019686)*X2.X4.X5 + (-0.01261)*X2.X4.X6 + (-0.0045415)*X2.X4.X7 + (0.02436)*X2.X4.X8 \\
& + (0.0019454)*X2.X4.X9 + (0.038174)*X2.X5.X6 + (0.067857)*X2.X5.X7 + (0.011251)*X2.X5.X8 \\
& + (-0.015054)*X2.X5.X9 + (0.0057543)*X2.X6.X7 + (-0.002834)*X2.X6.X8 \\
& + (-0.0024532)*X2.X6.X9 + (0.0057459)*X2.X7.X8 + (0.09017)*X2.X7.X9 + (0.046657)*X2.X8.X9 \\
& + (-0.10301)*X3.X4.X5 + (-0.012662)*X3.X4.X6 + (0.013775)*X3.X4.X7 + (0.027576)*X3.X4.X8 \\
& + (-0.016379)*X3.X4.X9 + (-0.013857)*X3.X5.X6 + (0.036567)*X3.X5.X7 + (0.015458)*X3.X5.X8 \\
& + (-0.060216)*X3.X5.X9 + (-0.0049641)*X3.X6.X7 + (-0.0072384)*X3.X6.X8 \\
& + (0.018506)*X3.X6.X9 + (0.0018578)*X3.X7.X8 + (0.075912)*X3.X7.X9 \\
& + (-0.0014935)*X3.X8.X9 + (-0.071069)*X4.X5.X6 + (0.013673)*X4.X5.X7 + (0.016028)*X4.X5.X8 \\
& + (0.016667)*X4.X5.X9 + (0.051618)*X4.X6.X7 + (0.0030685)*X4.X6.X8 + (0.0039668)*X4.X6.X9 \\
& + (0.0014415)*X4.X7.X8 + (0.03513)*X4.X7.X9 + (-0.016936)*X4.X8.X9 + (0.04656)*X5.X6.X7 \\
& + (-0.015245)*X5.X6.X8 + (-0.0036239)*X5.X6.X9 + (0.013818)*X5.X7.X8 + (0.022708)*X5.X7.X9 \\
& + (0.051305)*X5.X8.X9 + (0.014607)*X6.X7.X8 + (-0.0017213)*X6.X7.X9 + (-0.027254)*X6.X8.X9 \\
& + (0.020536)*X7.X8.X9
\end{aligned}$$

Agen

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned}
\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} &= 38,7756 + (3,1676)*X1 + (3,4643)*X2 + (16,2041)*X3 \\
&+ (-2,8179)*X4 + (5,4313)*X5 + (-1,1313)*X6 + (1,1711)*X7 + (2,1127)*X8 + (-2,1772)*X9 \\
&+ (-0,10069)*X8.X1 + (0,25296)*X1.X2 + (-0,37033)*X1.X5 + (0,38086)*X1.X3 + (0,29382)*X3.X2 \\
&+ (3,2392)*X3.X5 + (-0,6387)*X3.X4 + (-0,10451)*X5.X4 + (-0,12378)*X5.X7 \\
&+ (-0,4124)*X4.X7
\end{aligned} \tag{A9.5}$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned}
\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} &= 38,8581 + (3,203)*X1 + (3,3971)*X2 + (16,2374)*X3 + (-2,9161)*X4 \\
&+ (5,4024)*X5 + (-1,1172)*X6 + (1,2804)*X7 + (2,173)*X8 + (-2,2473)*X9 + (0,1411)*X3.X7 \\
&+ (0,12717)*X3.X1 + (0,13534)*X3.X6 + (-0,20948)*X3.X9 + (0,15732)*X3.X8 \\
&+ (3,1976)*X3.X5 + (-0,59317)*X3.X4 + (0,20445)*X3.X2 + (0,068892)*X2.X1 \\
&+ (-0,024178)*X2.X6 + (0,057563)*X2.X5 + (-0,1256)*X2.X4 + (0,073197)*X4.X7 \\
&+ (-0,10349)*X4.X1 + (-0,43214)*X4.X6 + (0,14892)*X4.X9 + (-0,080684)*X4.X8 \\
&+ (-0,36469)*X4.X5 + (0,13107)*X5.X7 + (-0,41701)*X5.X1 + (-0,42772)*X5.X6 \\
&+ (0,03973)*X5.X9 + (0,01409)*X8.X7 + (-0,001733)*X8.X6 + (0,023563)*X8.X9 \\
&+ (-0,03446)*X9.X1 + (-0,19364)*X9.X6 + (0,23725)*X6.X7 + (0,084866)*X6.X1 \\
&+ (0,11274)*X1.X7
\end{aligned} \tag{A9.6}$$

• Plan de Box-Behnken

$$\begin{aligned}
\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} &= 37,2987 + (3,2237)*X1 + (3,5254)*X2 + (16,184)*X3 + (-3,0972)*X4 \\
&+ (5,3297)*X5 + (-1,2268)*X6 + (1,3763)*X7 + (2,1892)*X8 + (-2,3037)*X9 + (0,066822)*X1.X2 \\
&+ (0,16563)*X1.X3 + (-0,065476)*X1.X4 + (-0,44918)*X1.X5 + (0,1271)*X1.X6 \\
&+ (0,014148)*X1.X7 + (0,044249)*X1.X8 + (-0,015751)*X1.X9 + (0,26453)*X2.X3 \\
&+ (-0,12238)*X2.X4 + (0,011793)*X2.X5 + (0,023671)*X2.X6 + (0,035315)*X2.X7 \\
&+ (0,017944)*X2.X8 + (-0,10673)*X2.X9 + (-0,60233)*X3.X4 + (3,179)*X3.X5 \\
&+ (0,15552)*X3.X6 + (0,21705)*X3.X7 + (0,15932)*X3.X8 + (-0,26015)*X3.X9 \\
&+ (-0,39181)*X4.X5 + (-0,44251)*X4.X6 + (0,11383)*X4.X7 + (-0,062246)*X4.X8 \\
&+ (0,16338)*X4.X9 + (-0,44069)*X5.X6 + (0,1593)*X5.X7 + (-0,01171)*X5.X8 \\
&+ (0,016965)*X5.X9 + (0,30717)*X6.X7 + (0,019809)*X6.X8 + (-0,16432)*X6.X9 \\
&+ (0,020243)*X7.X8 + (-0,066566)*X7.X9 + (-0,038125)*X8.X9 + (-0,086291)*X1^2 \\
&+ (0,011158)*X2^2 + (-0,3542)*X3^2 + (0,22638)*X4^2 + (0,11337)*X5^2 + (1,4784)*X6^2 \\
&+ (-0,16516)*X7^2 + (0,22909)*X8^2 + (0,036705)*X9^2
\end{aligned} \tag{A9.7}$$

• Plan de couplage n^2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$

$$\begin{aligned}
\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} &= 37,3201 + (3,2195)*X1 + (3,4953)*X2 + (16,1865)*X3 + (-3,0237)*X4 \\
&+ (5,3385)*X5 + (-1,1824)*X6 + (1,3437)*X7 + (2,1832)*X8 + (-2,3011)*X9 + (0,052539)*X1.X2 \\
&+ (0,18333)*X1.X3 + (-0,079823)*X1.X4 + (-0,41777)*X1.X5 + (0,10677)*X1.X6 \\
&+ (0,016022)*X1.X7 + (0,049646)*X1.X8 + (-0,04986)*X1.X9 + (0,29042)*X2.X3
\end{aligned} \tag{A9.8}$$

$+ (-0.12032)*X2.X4 + (0.013955)*X2.X5 + (0.016182)*X2.X6 + (0.036134)*X2.X7$
 $+ (0.012486)*X2.X8 + (-0.065096)*X2.X9 + (-0.60195)*X3.X4 + (3.1948)*X3.X5$
 $+ (0.15263)*X3.X6 + (0.19897)*X3.X7 + (0.16663)*X3.X8 + (-0.2503)*X3.X9 + (-0.41675)*X4.X5$
 $+ (-0.4299)*X4.X6 + (0.10097)*X4.X7 + (-0.074091)*X4.X8 + (0.1643)*X4.X9 + (-0.4469)*X5.X6$
 $+ (0.14328)*X5.X7 + (0.011298)*X5.X8 + (0.016323)*X5.X9 + (0.32019)*X6.X7$
 $+ (0.010084)*X6.X8 + (-0.16654)*X6.X9 + (0.011614)*X7.X8 + (-0.083091)*X7.X9$
 $+ (-0.046083)*X8.X9 + (-0.079793)*X1.X1 + (0.0064817)*X2.X2 + (-0.35955)*X3.X3$
 $+ (0.22657)*X4.X4 + (0.12009)*X5.X5 + (1.4758)*X6.X6 + (-0.16898)*X7.X7 + (0.22221)*X8.X8$
 $+ (0.044513)*X9.X9 + (-0.066598)*X1.X2.X3 + (0.014355)*X1.X2.X4 + (-0.012442)*X1.X2.X5$
 $+ (0.035907)*X1.X2.X6 + (-0.01857)*X1.X2.X7 + (0.045054)*X1.X2.X8 + (-0.011467)*X1.X2.X9$
 $+ (0.086544)*X1.X3.X4 + (-0.0098246)*X1.X3.X5 + (0.02426)*X1.X3.X6 + (0.0060112)*X1.X3.X7$
 $+ (-0.042312)*X1.X3.X8 + (0.048366)*X1.X3.X9 + (0.0043527)*X1.X4.X5$
 $+ (-0.0077719)*X1.X4.X6 + (0.032298)*X1.X4.X7 + (0.039103)*X1.X4.X8 + (0.031921)*X1.X4.X9$
 $+ (-0.0040763)*X1.X5.X6 + (-0.014338)*X1.X5.X7 + (-0.095497)*X1.X5.X8$
 $+ (-0.020592)*X1.X5.X9 + (0.00068666)*X1.X6.X7 + (-0.0084704)*X1.X6.X8$
 $+ (0.00095578)*X1.X6.X9 + (-0.024773)*X1.X7.X8 + (0.047411)*X1.X7.X9 + (0.02379)*X1.X8.X9$
 $+ (0.0055324)*X2.X3.X4 + (0.024098)*X2.X3.X5 + (0.029524)*X2.X3.X6 + (0.047367)*X2.X3.X7$
 $+ (-0.048294)*X2.X3.X8 + (-0.027874)*X2.X3.X9 + (-0.042908)*X2.X4.X5 + (-0.016592)*X2.X4.X6$
 $+ (0.00061443)*X2.X4.X7 + (0.038189)*X2.X4.X8 + (0.0039423)*X2.X4.X9$
 $+ (0.028782)*X2.X5.X6 + (0.056743)*X2.X5.X7 + (-0.024318)*X2.X5.X8 + (-0.017462)*X2.X5.X9$
 $+ (0.0068482)*X2.X6.X7 + (0.0052604)*X2.X6.X8 + (0.015568)*X2.X6.X9 + (0.021914)*X2.X7.X8$
 $+ (0.053716)*X2.X7.X9 + (0.046142)*X2.X8.X9 + (-0.11642)*X3.X4.X5 + (-0.092959)*X3.X4.X6$
 $+ (0.017094)*X3.X4.X7 + (0.034482)*X3.X4.X8 + (-0.019053)*X3.X4.X9 + (-0.007521)*X3.X5.X6$
 $+ (0.04142)*X3.X5.X7 + (0.0069804)*X3.X5.X8 + (-0.063353)*X3.X5.X9 + (0.0055823)*X3.X6.X7$
 $+ (0.032283)*X3.X6.X8 + (-0.0041374)*X3.X6.X9 + (-0.011099)*X3.X7.X8 + (0.031329)*X3.X7.X9$
 $+ (0.023724)*X3.X8.X9 + (-0.081869)*X4.X5.X6 + (0.0069779)*X4.X5.X7 + (0.015079)*X4.X5.X8$
 $+ (0.0084224)*X4.X5.X9 + (0.053224)*X4.X6.X7 + (-0.011261)*X4.X6.X8$
 $+ (-0.0045701)*X4.X6.X9 + (0.0026596)*X4.X7.X8 + (0.05306)*X4.X7.X9 + (-0.015137)*X4.X8.X9$
 $+ (0.053975)*X5.X6.X7 + (-0.022288)*X5.X6.X8 + (0.0032247)*X5.X6.X9$
 $+ (-0.0070948)*X5.X7.X8 + (0.029374)*X5.X7.X9 + (0.0152)*X5.X8.X9 + (0.01543)*X6.X7.X8$
 $+ (-0.010833)*X6.X7.X9 + (-0.054597)*X6.X8.X9 + (0.024879)*X7.X8.X9$

Nice

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

Chauffage (kWh/m².an) = $19.0938 + (1.6642)*X1 + (1.7668)*X2 + (8.8863)*X3 + (-2.0989)*X4$
 $+ (2.7229)*X5 + (-1.2282)*X6 + (1.3248)*X7 + (2.0987)*X8 + (-1.3805)*X9 + (-0.051952)*X8.X1$
 $+ (0.3559)*X1.X2 + (-0.11905)*X1.X5 + (0.4041)*X1.X3 + (0.26059)*X3.X2$
 $+ (1.8808)*X3.X5 + (-0.55443)*X3.X4 + (0.063428)*X5.X4 + (-0.049428)*X5.X7$
 $+ (-0.46897)*X4.X7$ (A9.9)

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

Chauffage (kWh/m².an) = $19.0697 + (1.7117)*X1 + (1.8423)*X2 + (8.9381)*X3 + (-2.2177)*X4$
 $+ (2.7556)*X5 + (-1.2842)*X6 + (1.4202)*X7 + (2.1546)*X8 + (-1.4935)*X9 + (0.26605)*X3.X7$
 $+ (0.12494)*X3.X1 + (0.14717)*X3.X6 + (-0.1693)*X3.X9 + (0.21895)*X3.X8$
 $+ (1.7484)*X3.X5 + (-0.52654)*X3.X4 + (0.090196)*X3.X2 + (0.04047)*X2.X1$
 $+ (0.03793)*X2.X6 + (0.071686)*X2.X5 + (-0.10416)*X2.X4 + (0.0034959)*X4.X7$
 $+ (-0.13849)*X4.X1 + (-0.40915)*X4.X6 + (0.15313)*X4.X9 + (-0.13357)*X4.X8$
 $+ (-0.27367)*X4.X5 + (0.13105)*X5.X7 + (-0.20171)*X5.X1 + (-0.40057)*X5.X6$
 $+ (0.064315)*X5.X9 + (0.075475)*X8.X7 + (0.0014771)*X8.X6 + (-0.009741)*X8.X9$
 $+ (-0.027423)*X9.X1 + (-0.18772)*X9.X6 + (0.34818)*X6.X7 + (0.0045572)*X6.X1$
 $+ (0.14847)*X1.X7$ (A9.10)

• Plan de Box-Behnken

Chauffage (kWh/m².an) = $17.361 + (1.766)*X1 + (1.8484)*X2 + (8.8555)*X3 + (-2.3328)*X4$
 $+ (2.6849)*X5 + (-1.3553)*X6 + (1.5465)*X7 + (2.1748)*X8 + (-1.5155)*X9 + (0.051121)*X1.X2$
 $+ (0.14013)*X1.X3 + (-0.067193)*X1.X4 + (-0.25384)*X1.X5 + (0.085171)*X1.X6$
 $+ (0.038951)*X1.X7 + (0.053773)*X1.X8 + (-0.012228)*X1.X9 + (0.19179)*X2.X3$
 $+ (-0.1128)*X2.X4 + (-0.0049371)*X2.X5 + (0.027999)*X2.X6 + (0.057665)*X2.X7$
 $+ (0.029117)*X2.X8 + (-0.099652)*X2.X9 + (-0.53522)*X3.X4 + (1.7068)*X3.X5$
 $+ (0.20048)*X3.X6 + (0.35714)*X3.X7 + (0.22122)*X3.X8 + (-0.25886)*X3.X9$
 $+ (-0.29089)*X4.X5 + (-0.44132)*X4.X6 + (0.027285)*X4.X7 + (-0.10015)*X4.X8$
 $+ (0.16532)*X4.X9 + (-0.41413)*X5.X6 + (0.1484)*X5.X7 + (-0.0051756)*X5.X8$ (A9.11)

$$\begin{aligned}
& + (0,020826)*X5.X9 + (0,4394)*X6.X7 + (0,037003)*X6.X8 + (-0,1646)*X6.X9 \\
& + (0,067906)*X7.X8 + (-0,1108)*X7.X9 + (-0,062541)*X8.X9 + (-0,042012)*X1^2 \\
& + (0,007674)*X2^2 + (-0,010985)*X3^2 + (0,21359)*X4^2 + (0,096184)*X5^2 + (1,3936)*X6^2 \\
& + (-0,17252)*X7^2 + (0,25099)*X8^2 + (0,038307)*X9^2
\end{aligned}$$

- **Plan de couplage n°2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

$$\begin{aligned}
\text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} = & 17.3929 + (1.751)*X1 + (1.8284)*X2 + (8.8702)*X3 + (-2.2853)*X4 \\
& + (2.6975)*X5 + (-1.3248)*X6 + (1.5068)*X7 + (2.1684)*X8 + (-1.5124)*X9 + (0.033016)*X1.X2 \\
& + (0.16306)*X1.X3 + (-0.092025)*X1.X4 + (-0.20421)*X1.X5 + (0.054329)*X1.X6 \\
& + (0.045473)*X1.X7 + (0.05576)*X1.X8 + (-0.048904)*X1.X9 + (0.21708)*X2.X3 \\
& + (-0.10378)*X2.X4 + (0.025844)*X2.X5 + (0.024109)*X2.X6 + (0.063512)*X2.X7 \\
& + (0.026244)*X2.X8 + (-0.06074)*X2.X9 + (-0.53446)*X3.X4 + (1.7423)*X3.X5 + (0.17986)*X3.X6 \\
& + (0.31665)*X3.X7 + (0.22853)*X3.X8 + (-0.24353)*X3.X9 + (-0.33331)*X4.X5 + (-0.42403)*X4.X6 \\
& + (0.025719)*X4.X7 + (-0.12789)*X4.X8 + (0.17197)*X4.X9 + (-0.4268)*X5.X6 + (0.1393)*X5.X7 \\
& + (0.020391)*X5.X8 + (0.0074864)*X5.X9 + (0.43111)*X6.X7 + (0.03108)*X6.X8 \\
& + (-0.14939)*X6.X9 + (0.079042)*X7.X8 + (-0.12991)*X7.X9 + (-0.084775)*X8.X9 \\
& + (-0.04968)*X1.X1 + (0.00012009)*X2.X2 + (-0.0248)*X3.X3 + (0.20169)*X4.X4 \\
& + (0.094885)*X5.X5 + (1.3786)*X6.X6 + (-0.18756)*X7.X7 + (0.23477)*X8.X8 + (0.044301)*X9.X9 \\
& + (-0.059854)*X1.X2.X3 + (0.025405)*X1.X2.X4 + (-0.013414)*X1.X2.X5 + (0.039212)*X1.X2.X6 \\
& + (-0.0026541)*X1.X2.X7 + (0.036433)*X1.X2.X8 + (-0.0042998)*X1.X2.X9 + (0.08593)*X1.X3.X4 \\
& + (-0.02155)*X1.X3.X5 + (0.025274)*X1.X3.X6 + (-0.0097124)*X1.X3.X7 + (-0.077109)*X1.X3.X8 \\
& + (-0.0093553)*X1.X3.X9 + (0.0097426)*X1.X4.X5 + (-0.019563)*X1.X4.X6 \\
& + (0.039528)*X1.X4.X7 + (0.040455)*X1.X4.X8 + (0.0010935)*X1.X4.X9 \\
& + (-0.0035647)*X1.X5.X6 + (-0.017109)*X1.X5.X7 + (-0.067847)*X1.X5.X8 \\
& + (-0.0049132)*X1.X5.X9 + (0.0028848)*X1.X6.X7 + (-0.0035158)*X1.X6.X8 \\
& + (-0.004566)*X1.X6.X9 + (-0.033716)*X1.X7.X8 + (0.050721)*X1.X7.X9 + (0.021699)*X1.X8.X9 \\
& + (-0.0019789)*X2.X3.X4 + (0.013334)*X2.X3.X5 + (0.030352)*X2.X3.X6 + (0.017247)*X2.X3.X7 \\
& + (-0.060452)*X2.X3.X8 + (-0.04604)*X2.X3.X9 + (-0.03187)*X2.X4.X5 + (-0.018982)*X2.X4.X6 \\
& + (-0.0039553)*X2.X4.X7 + (0.020286)*X2.X4.X8 + (-0.00093235)*X2.X4.X9 \\
& + (0.038353)*X2.X5.X6 + (0.035689)*X2.X5.X7 + (-0.03717)*X2.X5.X8 + (-0.0047584)*X2.X5.X9 \\
& + (0.015728)*X2.X6.X7 + (-0.0022311)*X2.X6.X8 + (0.0019522)*X2.X6.X9 \\
& + (0.032238)*X2.X7.X8 + (0.068848)*X2.X7.X9 + (0.039475)*X2.X8.X9 + (-0.10947)*X3.X4.X5 \\
& + (-0.098364)*X3.X4.X6 + (0.051031)*X3.X4.X7 + (0.057254)*X3.X4.X8 + (-0.0057712)*X3.X4.X9 \\
& + (-0.0034867)*X3.X5.X6 + (0.05576)*X3.X5.X7 + (0.0034701)*X3.X5.X8 + (-0.049017)*X3.X5.X9 \\
& + (0.041877)*X3.X6.X7 + (0.049027)*X3.X6.X8 + (-0.026783)*X3.X6.X9 + (-0.037715)*X3.X7.X8 \\
& + (0.094153)*X3.X7.X9 + (0.021591)*X3.X8.X9 + (-0.081511)*X4.X5.X6 + (0.0006297)*X4.X5.X7 \\
& + (0.015083)*X4.X5.X8 + (0.025453)*X4.X5.X9 + (0.03224)*X4.X6.X7 + (-0.038241)*X4.X6.X8 \\
& + (0.013799)*X4.X6.X9 + (0.023127)*X4.X7.X8 + (0.032266)*X4.X7.X9 + (-0.020834)*X4.X8.X9 \\
& + (0.062901)*X5.X6.X7 + (-0.019202)*X5.X6.X8 + (-0.0063886)*X5.X6.X9 + (0.026184)*X5.X7.X8 \\
& + (0.044468)*X5.X7.X9 + (0.0018841)*X5.X8.X9 + (0.040088)*X6.X7.X8 + (-0.025643)*X6.X7.X9 \\
& + (-0.063182)*X6.X8.X9 + (0.050943)*X7.X8.X9
\end{aligned}$$

(A9.12)

Annexe A10 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation des besoins de rafraîchissement

Nancy

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned} \text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} = & 4.7047 + (-0.16446)*X_1 + (0.073454)*X_2 + (-0.92854)*X_3 \\ & + (1.7442)*X_4 + (0.96611)*X_5 + (-2.8437)*X_6 + (-0.058144)*X_7 + (0.049101)*X_8 + (0.36565)*X_9 \\ & + (-1.2529)*X_{10} + (-2.1255)*X_{11} + (-0.20024)*X_3.X_5 + (-0.10921)*X_3.X_4 + (1.3986)*X_3.X_{10} \\ & + (0.20194)*X_{10}.X_6 + (-0.15029)*X_{10}.X_9 + (0.86411)*X_{10}.X_{11} + (-0.012367)*X_{10}.X_5 \\ & + (-0.31809)*X_{10}.X_4 + (-0.2966)*X_{11}.X_5 + (-0.47909)*X_{11}.X_4 + (-0.14891)*X_{11}.X_7 \\ & + (-0.68257)*X_7.X_5 + (-0.44956)*X_7.X_4 + (0.29667)*X_4.X_5 \end{aligned} \quad (A10.1)$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned} \text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} = & 4.8762 + (-0.44979)*X_1 + (-0.3618)*X_2 + (-1.2865)*X_3 \\ & + (1.8483)*X_4 + (0.92053)*X_5 + (-2.6027)*X_6 + (-0.04455)*X_7 + (-0.10687)*X_8 + (0.38566)*X_9 \\ & + (-1.335)*X_{10} + (-2.3412)*X_{11} + (0.68946)*X_3.X_{10} + (0.27759)*X_3.X_6 + (0.084952)*X_3.X_9 \\ & + (0.45985)*X_3.X_{11} + (-0.3431)*X_3.X_4 + (0.2759)*X_3.X_2 + (0.30894)*X_2.X_{10} + (0.026132)*X_2.X_6 \\ & + (-0.18216)*X_3.X_7 + (0.092754)*X_2.X_{11} + (0.0099302)*X_2.X_5 + (-0.083793)*X_2.X_4 \\ & + (-0.092765)*X_4.X_7 + (-0.53093)*X_4.X_{10} + (-0.82118)*X_4.X_6 + (-0.11039)*X_4.X_9 \\ & + (-0.71543)*X_4.X_{11} + (0.42292)*X_4.X_5 + (-0.069227)*X_5.X_7 + (0.05502)*X_5.X_{10} \\ & + (-0.51992)*X_5.X_6 + (-0.014874)*X_5.X_9 + (-0.62553)*X_5.X_{11} + (-0.052308)*X_{11}.X_7 \\ & + (0.58165)*X_{11}.X_{10} + (0.81085)*X_{11}.X_6 + (-0.10397)*X_{11}.X_9 + (-0.12979)*X_9.X_{10} \\ & + (-0.42814)*X_9.X_6 + (0.08757)*X_9.X_8 + (-0.15102)*X_6.X_7 + (-0.28702)*X_6.X_{10} \\ & + (0.044219)*X_6.X_8 + (-0.019028)*X_{10}.X_7 + (-0.14265)*X_3.X_5 \end{aligned} \quad (A10.2)$$

• Plan de Box-Behnken

$$\begin{aligned} \text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} = & 2.1098 + (-0.11577)*X_1 + (-0.17928)*X_2 + (-0.91573)*X_3 \\ & + (1.5056)*X_4 + (0.79581)*X_5 + (-2.6976)*X_6 + (-0.024373)*X_7 + (-0.085168)*X_8 + (0.42668)*X_9 \\ & + (-1.3033)*X_{10} + (-1.9672)*X_{11} + (0.018828)*X_1.X_2 + (0.23633)*X_1.X_3 + (-0.056522)*X_1.X_4 \\ & + (-0.005562)*X_1.X_5 + (-0.087495)*X_1.X_6 + (0.01662)*X_1.X_7 + (0.0056034)*X_1.X_8 \\ & + (0.0028279)*X_1.X_9 + (0.12024)*X_1.X_{10} + (0.1569)*X_1.X_{11} + (0.068468)*X_2.X_3 \\ & + (-0.053195)*X_2.X_4 + (-0.010971)*X_2.X_5 + (0.055288)*X_2.X_6 + (0.023257)*X_2.X_7 \\ & + (0.017381)*X_2.X_8 + (0.013584)*X_2.X_9 + (0.13665)*X_2.X_{10} + (0.10239)*X_2.X_{11} \\ & + (-0.38931)*X_3.X_4 + (-0.26504)*X_3.X_5 + (0.3448)*X_3.X_6 + (-0.0042967)*X_3.X_7 \\ & + (0.042539)*X_3.X_8 + (-0.10987)*X_3.X_9 + (0.69828)*X_3.X_{10} + (0.44452)*X_3.X_{11} \\ & + (0.33442)*X_4.X_5 + (-0.89714)*X_4.X_6 + (0.027072)*X_4.X_7 + (0.030573)*X_4.X_8 + (0.1178)*X_4.X_9 \\ & + (-0.57247)*X_4.X_{10} + (-0.69497)*X_4.X_{11} + (-0.51058)*X_5.X_6 + (0.12055)*X_5.X_7 \\ & + (0.061834)*X_5.X_8 + (0.010903)*X_5.X_9 + (-0.013846)*X_5.X_{10} + (-0.47209)*X_5.X_{11} \\ & + (0.014062)*X_6.X_7 + (-0.035725)*X_6.X_8 + (-0.24161)*X_6.X_9 + (-0.1974)*X_6.X_{10} \\ & + (0.85534)*X_6.X_{11} + (0.039574)*X_7.X_8 + (-0.016016)*X_7.X_9 + (-0.083512)*X_7.X_{10} \\ & + (0.035839)*X_7.X_{11} + (0.010712)*X_8.X_9 + (0.065859)*X_8.X_{10} + (-0.025713)*X_8.X_{11} \\ & + (-0.15252)*X_9.X_{10} + (-0.16678)*X_9.X_{11} + (0.55313)*X_{10}.X_{11} + (0.016475)*X_1^2 \\ & + (-0.042043)*X_2^2 + (0.28557)*X_3^2 + (0.22082)*X_4^2 + (0.039715)*X_5^2 + (0.98968)*X_6^2 \\ & + (0.099517)*X_7^2 + (-0.066593)*X_8^2 + (0.00074547)*X_9^2 + (0.89327)*X_{10}^2 + (0.32434)*X_{11}^2 \end{aligned} \quad (A10.3)$$

• Plan de couplage n°2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$

$$\begin{aligned} \text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} = & 2.1257 + (-0.11719)*X_1 + (-0.25874)*X_2 + (-0.64479)*X_3 \\ & + (1.2684)*X_4 + (0.68285)*X_5 + (-2.7879)*X_6 + (-0.01951)*X_7 + (-0.10736)*X_8 + (0.43236)*X_9 \\ & + (-0.80987)*X_{10} + (-1.725)*X_{11} + (0.034849)*X_1.X_2 + (0.096029)*X_1.X_3 + (-0.09093)*X_1.X_4 \\ & + (-0.03932)*X_1.X_5 + (-0.0062833)*X_1.X_6 + (-0.012155)*X_1.X_7 + (-0.0037513)*X_1.X_8 \\ & + (-0.02232)*X_1.X_9 + (0.11217)*X_1.X_{10} + (0.07649)*X_1.X_{11} + (0.1534)*X_2.X_3 \\ & + (-0.10907)*X_2.X_4 + (-5.2292e-005)*X_2.X_5 + (0.015977)*X_2.X_6 + (-0.039486)*X_2.X_7 \\ & + (0.044685)*X_2.X_8 + (-0.060263)*X_2.X_9 + (0.22569)*X_2.X_{10} + (0.10663)*X_2.X_{11} \\ & + (-0.37567)*X_3.X_4 + (-0.26775)*X_3.X_5 + (0.28952)*X_3.X_6 + (-0.010972)*X_3.X_7 \\ & + (0.070107)*X_3.X_8 + (-0.12453)*X_3.X_9 + (0.67047)*X_3.X_{10} + (0.45469)*X_3.X_{11} \end{aligned} \quad (A10.4)$$

+ (0.35223)*X4.X5 + (-0.82842)*X4.X6 + (0.016372)*X4.X7 + (-0.029285)*X4.X8
 + (0.13664)*X4.X9 + (-0.53489)*X4.X10 + (-0.72803)*X4.X11 + (-0.49727)*X5.X6
 + (0.0018893)*X5.X7 + (-0.0050451)*X5.X8 + (0.10624)*X5.X9 + (-0.030685)*X5.X10
 + (-0.51135)*X5.X11 + (0.072029)*X6.X7 + (0.030146)*X6.X8 + (-0.15558)*X6.X9
 + (-0.2564)*X6.X10 + (0.82097)*X6.X11 + (-0.0022354)*X7.X8 + (0.011336)*X7.X9
 + (-0.050026)*X7.X10 + (-0.0094819)*X7.X11 + (0.0048521)*X8.X9 + (0.095924)*X8.X10
 + (0.042741)*X8.X11 + (-0.17558)*X9.X10 + (-0.15045)*X9.X11 + (0.59345)*X10.X11
 + (0.30818)*X3.X3 + (0.20001)*X4.X4 + (0.97347)*X6.X6 + (0.4498)*X10.X10
 + (0.32776)*X11.X11 + (-0.45414)*X10.X10.X10 + (0.46385)*X10.X10.X10
 + (0.026016)*X2.X3.X4 + (0.030077)*X2.X3.X5 + (0.036407)*X2.X3.X6 + (-0.22137)*X2.X3.X10
 + (-0.072704)*X2.X3.X11 + (0.063218)*X2.X4.X5 + (-0.043138)*X2.X4.X6 + (0.10542)*X2.X4.X10
 + (0.029085)*X2.X4.X11 + (-0.028507)*X2.X5.X6 + (-0.027745)*X2.X5.X10
 + (0.042103)*X2.X5.X11 + (0.10568)*X2.X6.X10 + (0.1262)*X2.X6.X11
 + (-0.085865)*X2.X10.X11 + (-0.066976)*X3.X4.X5 + (-0.036253)*X3.X4.X6
 + (0.23195)*X3.X4.X10 + (0.056277)*X3.X4.X11 + (0.017319)*X3.X5.X6
 + (-0.00059179)*X3.X5.X10 + (0.11356)*X3.X5.X11 + (0.24415)*X3.X6.X10
 + (0.069118)*X3.X6.X11 + (-0.28488)*X3.X10.X11 + (-0.081687)*X4.X5.X6
 + (-0.0089522)*X4.X5.X10 + (-0.11699)*X4.X5.X11 + (-0.25912)*X4.X6.X10
 + (0.11983)*X4.X6.X11 + (0.12534)*X4.X10.X11 + (-0.12396)*X5.X6.X10 + (0.10736)*X5.X6.X11
 + (0.049971)*X5.X10.X11 + (0.32261)*X6.X10.X11 + (-0.010737)*X3.X4.X4
 + (-0.0090282)*X3.X5.X5 + (-0.092596)*X3.X6.X6 + (-0.54834)*X3.X10.X10
 + (-0.020367)*X3.X11.X11 + (0.13129)*X4.X3.X3 + (-0.00030394)*X4.X5.X5
 + (0.095142)*X4.X6.X6 + (0.30522)*X4.X10.X10 + (0.066937)*X4.X11.X11
 + (0.089231)*X5.X3.X3 + (0.032517)*X5.X4.X4 + (0.11311)*X5.X6.X6 + (-0.038806)*X5.X10.X10
 + (0.065405)*X5.X11.X11 + (0.0046231)*X6.X3.X3 + (-0.024791)*X6.X4.X4
 + (0.05559)*X6.X5.X5 + (0.14957)*X6.X10.X10 + (0.034051)*X6.X11.X11 + (-0.2853)*X10.X3.X3
 + (-0.060692)*X10.X4.X4 + (-0.0020908)*X10.X5.X5 + (0.26874)*X10.X6.X6
 + (0.0017971)*X10.X11.X11 + (-0.11531)*X11.X3.X3 + (-0.13658)*X11.X4.X4
 + (0.080348)*X11.X5.X5 + (-0.085424)*X11.X6.X6 + (-0.34838)*X11.X10.X10

Agén

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

Rafraîchissement (kWh/m².an) = 8.7796 + (-0.19212)*X1 + (-0.083914)*X2 + (-1.1889)*X3
 + (2.9791)*X4 + (1.561)*X5 + (-4.1124)*X6 + (-0.0034165)*X7 + (0.049994)*X8 + (0.59792)*X9
 + (-2.4354)*X10 + (-4.0395)*X11 + (-0.21708)*X3.X5 + (-0.094039)*X3.X4 + (2.0006)*X3.X10
 + (-0.13021)*X10.X6 + (-0.23782)*X10.X9 + (1.2045)*X10.X11 + (0.027554)*X10.X5
 + (-0.57295)*X10.X4 + (-0.68005)*X11.X5 + (-1.0206)*X11.X4 + (-0.25245)*X11.X7
 + (-0.75246)*X7.X5 + (-0.6112)*X7.X4 + (0.43229)*X4.X5 (A10.5)

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

Rafraîchissement (kWh/m².an) = 8.9383 + (-0.56704)*X1 + (-0.45767)*X2 + (-1.8365)*X3
 + (3.0191)*X4 + (1.505)*X5 + (-3.8609)*X6 + (0.013853)*X7 + (-0.10938)*X8 + (0.72019)*X9
 + (-2.5983)*X10 + (-4.3628)*X11 + (1.0087)*X3.X10 + (0.13415)*X3.X6 + (0.19927)*X3.X9
 + (0.57363)*X3.X11 + (-0.33412)*X3.X4 + (0.32634)*X3.X2 + (0.36367)*X2.X10
 + (0.0091557)*X2.X6 + (-0.22695)*X3.X7 + (0.1129)*X2.X11 + (0.094247)*X2.X5
 + (-0.084686)*X2.X4 + (-0.099343)*X4.X7 + (-0.78501)*X4.X10 + (-0.97578)*X4.X6
 + (-0.19857)*X4.X9 + (-1.2205)*X4.X11 + (0.59465)*X4.X5 + (-0.13399)*X5.X7
 + (0.092826)*X5.X10 + (-0.70884)*X5.X6 + (-0.0046728)*X5.X9 + (-1.0194)*X5.X11
 + (-0.10517)*X11.X7 + (1.0699)*X11.X10 + (1.1046)*X11.X6 + (-0.21267)*X11.X9
 + (-0.15242)*X9.X10 + (-0.46832)*X9.X6 + (0.11127)*X9.X8 + (-0.16219)*X6.X7
 + (-0.74578)*X6.X10 + (-0.0042644)*X6.X8 + (-0.055576)*X10.X7 + (-0.17691)*X3.X5 (A10.6)

• Plan de Box-Behnken

Rafraîchissement (kWh/m².an) = 4.9369 + (-0.13034)*X1 + (-0.27245)*X2 + (-1.4536)*X3
 + (2.6753)*X4 + (1.3602)*X5 + (-4.2022)*X6 + (0.060058)*X7 + (-0.09851)*X8 + (0.78267)*X9
 + (-2.6387)*X10 + (-3.9185)*X11 + (0.01059)*X1.X2 + (0.39274)*X1.X3 + (-0.066517)*X1.X4
 + (0.0033738)*X1.X5 + (-0.1069)*X1.X6 + (0.016728)*X1.X7 + (0.019314)*X1.X8
 + (-0.0018116)*X1.X9 + (0.18993)*X1.X10 + (0.25021)*X1.X11 + (0.10832)*X2.X3
 + (-0.085817)*X2.X4 + (-0.016071)*X2.X5 + (0.022202)*X2.X6 + (0.028391)*X2.X7
 + (0.0031767)*X2.X8 + (-0.061184)*X2.X9 + (0.22067)*X2.X10 + (0.13561)*X2.X11
 + (-0.44635)*X3.X4 + (-0.34766)*X3.X5 + (0.20027)*X3.X6 + (-0.0056881)*X3.X7
 + (0.035988)*X3.X8 + (-0.16073)*X3.X9 + (1.0458)*X3.X10 + (0.57494)*X3.X11 (A10.7)

$$\begin{aligned}
& + (0.50512)*X4.X5 + (-1.0687)*X4.X6 + (0.051762)*X4.X7 + (0.0529)*X4.X8 + (0.16505)*X4.X9 \\
& + (-0.81295)*X4.X10 + (-1.2296)*X4.X11 + (-0.71789)*X5.X6 + (0.099979)*X5.X7 \\
& + (0.0080609)*X5.X8 + (0.016319)*X5.X9 + (0.069375)*X5.X10 + (-0.86136)*X5.X11 \\
& + (0.022078)*X6.X7 + (-0.097827)*X6.X8 + (-0.29061)*X6.X9 + (-0.7035)*X6.X10 \\
& + (1.1514)*X6.X11 + (0.045906)*X7.X8 + (-0.0096433)*X7.X9 + (-0.11594)*X7.X10 \\
& + (-0.059407)*X7.X11 + (0.015046)*X8.X9 + (0.084136)*X8.X10 + (-0.026673)*X8.X11 \\
& + (-0.22392)*X9.X10 + (-0.23643)*X9.X11 + (1.0118)*X10.X11 + (-0.0014499)*X1^2 \\
& + (-0.03291)*X2^2 + (0.35537)*X3^2 + (0.28138)*X4^2 + (0.011132)*X5^2 + (1.1982)*X6^2 \\
& + (0.13568)*X7^2 + (-0.033971)*X8^2 + (0.0015149)*X9^2 + (1.5573)*X10^2 + (0.55283)*X11^2
\end{aligned}$$

• **Plan de couplage n°2 : Plan de Box-Behnken + Composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

$$\begin{aligned}
\text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} = & 4.9705 + (-0.13467)*X1 + (-0.34801)*X2 + (-1.1865)*X3 \\
& + (2.4491)*X4 + (1.2351)*X5 + (-4.4531)*X6 + (0.050183)*X7 + (-0.11277)*X8 + (0.76988)*X9 \\
& + (-1.9591)*X10 + (-3.6497)*X11 + (0.030986)*X1.X2 + (0.083405)*X1.X3 + (-0.095411)*X1.X4 \\
& + (-0.016582)*X1.X5 + (-0.038503)*X1.X6 + (-0.017694)*X1.X7 + (0.035978)*X1.X8 \\
& + (-0.030427)*X1.X9 + (0.13295)*X1.X10 + (0.095651)*X1.X11 + (0.16768)*X2.X3 \\
& + (-0.12951)*X2.X4 + (0.021191)*X2.X5 + (-0.00067513)*X2.X6 + (-0.047448)*X2.X7 \\
& + (0.040962)*X2.X8 + (-0.061235)*X2.X9 + (0.29202)*X2.X10 + (0.13919)*X2.X11 \\
& + (-0.39297)*X3.X4 + (-0.32004)*X3.X5 + (0.15219)*X3.X6 + (-0.012104)*X3.X7 \\
& + (0.074662)*X3.X8 + (-0.15907)*X3.X9 + (1.0008)*X3.X10 + (0.57546)*X3.X11 \\
& + (0.51814)*X4.X5 + (-0.98868)*X4.X6 + (0.023236)*X4.X7 + (-0.034959)*X4.X8 \\
& + (0.17488)*X4.X9 + (-0.79251)*X4.X10 + (-1.2506)*X4.X11 + (-0.69342)*X5.X6 \\
& + (0.020233)*X5.X7 + (-0.0066576)*X5.X8 + (0.10555)*X5.X9 + (0.022364)*X5.X10 \\
& + (-0.89646)*X5.X11 + (0.094001)*X6.X7 + (-0.0005586)*X6.X8 + (-0.2082)*X6.X9 \\
& + (-0.72858)*X6.X10 + (1.1232)*X6.X11 + (0.0041238)*X7.X8 + (0.01712)*X7.X9 \\
& + (-0.092233)*X7.X10 + (-0.093597)*X7.X11 + (0.015712)*X8.X9 + (0.10567)*X8.X10 \\
& + (0.054965)*X8.X11 + (-0.26435)*X9.X10 + (-0.21197)*X9.X11 + (1.0689)*X10.X11 \\
& + (0.38502)*X3.X3 + (0.24504)*X4.X4 + (1.1784)*X6.X6 + (1.1514)*X10.X10 \\
& + (0.55128)*X11.X11 + (-0.69951)*X10.X10.X10 + (0.43024)*X10.X10.X10.X10 \\
& + (0.027538)*X2.X3.X4 + (-0.010189)*X2.X3.X5 + (0.054022)*X2.X3.X6 + (-0.18551)*X2.X3.X10 \\
& + (-0.058658)*X2.X3.X11 + (0.041686)*X2.X4.X5 + (-0.063992)*X2.X4.X6 + (0.11356)*X2.X4.X10 \\
& + (0.014412)*X2.X4.X11 + (0.0088734)*X2.X5.X6 + (-0.047849)*X2.X5.X10 \\
& + (0.046149)*X2.X5.X11 + (0.12071)*X2.X6.X10 + (0.13298)*X2.X6.X11 \\
& + (-0.084996)*X2.X10.X11 + (-0.075333)*X3.X4.X5 + (-0.12244)*X3.X4.X6 \\
& + (0.21361)*X3.X4.X10 + (0.031371)*X3.X4.X11 + (-0.005571)*X3.X5.X6 \\
& + (0.013003)*X3.X5.X10 + (0.133)*X3.X5.X11 + (0.37339)*X3.X6.X10 + (0.15264)*X3.X6.X11 \\
& + (-0.26424)*X3.X10.X11 + (-0.095668)*X4.X5.X6 + (-0.011606)*X4.X5.X10 \\
& + (-0.24045)*X4.X5.X11 + (-0.4173)*X4.X6.X10 + (0.051551)*X4.X6.X11 + (0.18244)*X4.X10.X11 \\
& + (-0.14921)*X5.X6.X10 + (0.14921)*X5.X6.X11 + (0.049689)*X5.X10.X11 \\
& + (0.61156)*X6.X10.X11 + (0.051201)*X3.X4.X4 + (-0.034552)*X3.X5.X5 + (-0.044506)*X3.X6.X6 \\
& + (-0.68415)*X3.X10.X10 + (0.023374)*X3.X11.X11 + (0.11447)*X4.X3.X3 \\
& + (-0.024358)*X4.X5.X5 + (0.035655)*X4.X6.X6 + (0.39697)*X4.X10.X10 \\
& + (0.068286)*X4.X11.X11 + (0.12908)*X5.X3.X3 + (0.016734)*X5.X4.X4 + (0.15869)*X5.X6.X6 \\
& + (-0.10936)*X5.X10.X10 + (0.10124)*X5.X11.X11 + (0.076144)*X6.X3.X3 \\
& + (0.014235)*X6.X4.X4 + (0.050776)*X6.X5.X5 + (0.33691)*X6.X10.X10 + (0.14605)*X6.X11.X11 \\
& + (-0.32794)*X10.X3.X3 + (-0.036284)*X10.X4.X4 + (0.0084704)*X10.X5.X5 \\
& + (0.34777)*X10.X6.X6 + (0.064216)*X10.X11.X11 + (-0.12833)*X11.X3.X3 \\
& + (-0.14369)*X11.X4.X4 + (0.079113)*X11.X5.X5 + (-0.031219)*X11.X6.X6 \\
& + (-0.47003)*X11.X10.X10
\end{aligned} \tag{A10.8}$$

Nice

• **Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$**

$$\begin{aligned}
\text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} = & 17.3428 + (-0.037684)*X1 + (-0.13378)*X2 + (-1.6679)*X3 \\
& + (4.7037)*X4 + (2.4217)*X5 + (-4.5647)*X6 + (-0.29255)*X7 + (-0.1916)*X8 + (0.88623)*X9 \\
& + (-3.0381)*X10 + (-7.2468)*X11 + (-0.16645)*X3.X5 + (-0.18076)*X3.X4 + (1.8489)*X3.X10 \\
& + (-0.18914)*X10.X6 + (-0.11686)*X10.X9 + (0.90321)*X10.X11 + (0.027677)*X10.X5 \\
& + (-0.34278)*X10.X4 + (-1.1829)*X11.X5 + (-1.7848)*X11.X4 + (0.065496)*X11.X7 \\
& + (-0.6029)*X7.X5 + (-0.78287)*X7.X4 + (0.57991)*X4.X5
\end{aligned} \tag{A10.9}$$

• **Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$**

$$\text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} = 17.4107 + (-0.59409)*X1 + (-0.44182)*X2 + (-2.1095)*X3 \tag{A10.10}$$

$$\begin{aligned}
& + (4.7482)*X_4 + (2.5054)*X_5 + (-4.4323)*X_6 + (-0.19957)*X_7 + (-0.21072)*X_8 + (1.2606)*X_9 \\
& + (-3.1824)*X_{10} + (-7.455)*X_{11} + (0.85168)*X_3.X_{10} + (-0.024343)*X_3.X_6 + (0.11112)*X_3.X_9 \\
& + (0.7813)*X_3.X_{11} + (-0.34738)*X_3.X_4 + (0.26645)*X_3.X_2 + (0.37595)*X_2.X_{10} \\
& + (0.004349)*X_2.X_6 + (-0.20106)*X_3.X_7 + (0.089466)*X_2.X_{11} + (0.057994)*X_2.X_5 \\
& + (-0.015952)*X_2.X_4 + (-0.18765)*X_4.X_7 + (-0.68664)*X_4.X_{10} + (-0.86192)*X_4.X_6 \\
& + (-0.10132)*X_4.X_9 + (-1.8946)*X_4.X_{11} + (0.90188)*X_4.X_5 + (-0.10715)*X_5.X_7 + (0.2392)*X_5.X_{10} \\
& + (-0.67114)*X_5.X_6 + (0.016969)*X_5.X_9 + (-1.6269)*X_5.X_{11} + (0.17149)*X_{11}.X_7 \\
& + (0.95457)*X_{11}.X_{10} + (1.1383)*X_{11}.X_6 + (-0.26071)*X_{11}.X_9 + (-0.076832)*X_9.X_{10} \\
& + (-0.35925)*X_9.X_6 + (0.062432)*X_9.X_8 + (-0.14678)*X_6.X_7 + (-1.0398)*X_6.X_{10} \\
& + (0.011997)*X_6.X_8 + (-0.017869)*X_{10}.X_7 + (-0.1398)*X_3.X_5
\end{aligned}$$

• Plan de Box-Behnken

$$\begin{aligned}
\text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} &= 13.4558 + (-0.044507)*X_1 + (-0.31575)*X_2 + (-1.7335)*X_3 \\
& + (4.3096)*X_4 + (2.2216)*X_5 + (-4.7299)*X_6 + (-0.098735)*X_7 + (-0.18199)*X_8 + (1.2519)*X_9 \\
& + (-3.1367)*X_{10} + (-6.6672)*X_{11} + (0.0742)*X_1.X_2 + (0.31973)*X_1.X_3 + (-0.085907)*X_1.X_4 \\
& + (-0.010017)*X_1.X_5 + (-0.10214)*X_1.X_6 + (0.034766)*X_1.X_7 + (0.029257)*X_1.X_8 \\
& + (0.0062364)*X_1.X_9 + (0.12764)*X_1.X_{10} + (0.26352)*X_1.X_{11} + (0.10222)*X_2.X_3 \\
& + (-0.08632)*X_2.X_4 + (-0.0057153)*X_2.X_5 + (-0.0082591)*X_2.X_6 + (0.054985)*X_2.X_7 \\
& + (0.035554)*X_2.X_8 + (-0.026473)*X_2.X_9 + (0.17896)*X_2.X_{10} + (0.14956)*X_2.X_{11} \\
& + (-0.38723)*X_3.X_4 + (-0.35789)*X_3.X_5 + (0.10842)*X_3.X_6 + (0.067154)*X_3.X_7 \\
& + (0.11027)*X_3.X_8 + (-0.18662)*X_3.X_9 + (0.86013)*X_3.X_{10} + (0.7505)*X_3.X_{11} + (0.67842)*X_4.X_5 \\
& + (-0.94702)*X_4.X_6 + (-0.050466)*X_4.X_7 + (0.047789)*X_4.X_8 + (0.1495)*X_4.X_9 \\
& + (-0.68882)*X_4.X_{10} + (-1.7349)*X_4.X_{11} + (-0.72182)*X_5.X_6 + (0.042594)*X_5.X_7 \\
& + (0.074259)*X_5.X_8 + (0.0077275)*X_5.X_9 + (0.14045)*X_5.X_{10} + (-1.3117)*X_5.X_{11} \\
& + (0.13288)*X_6.X_7 + (-0.15617)*X_6.X_8 + (-0.26704)*X_6.X_9 + (-1.0588)*X_6.X_{10} + (1.1806)*X_6.X_{11} \\
& + (0.071439)*X_7.X_8 + (-0.064583)*X_7.X_9 + (-0.059738)*X_7.X_{10} + (0.18032)*X_7.X_{11} \\
& + (-0.045275)*X_8.X_9 + (0.13013)*X_8.X_{10} + (0.053219)*X_8.X_{11} + (-0.17643)*X_9.X_{10} \\
& + (-0.29671)*X_9.X_{11} + (0.94373)*X_{10}.X_{11} + (-0.0090447)*X_1^2 + (-0.021246)*X_2^2 + (0.35651)*X_3^2 \\
& + (0.17209)*X_4^2 + (-0.082664)*X_5^2 + (1.0099)*X_6^2 + (0.38321)*X_7^2 + (-0.027447)*X_8^2 \\
& + (0.0071171)*X_9^2 + (1.2957)*X_{10}^2 + (0.76536)*X_{11}^2
\end{aligned} \tag{A10.11}$$

• Plan de couplage n°2 : Plan de Box-Behnken + Composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$

$$\begin{aligned}
\text{Rafraîchissement (kWh/m}^2\text{.an)} &= 13.4624 + (-0.039959)*X_1 + (-0.37134)*X_2 + (-1.454)*X_3 \\
& + (4.0162)*X_4 + (2.0165)*X_5 + (-4.9679)*X_6 + (-0.13677)*X_7 + (-0.22251)*X_8 + (1.2734)*X_9 \\
& + (-2.5866)*X_{10} + (-6.2059)*X_{11} + (0.025573)*X_1.X_2 + (0.10975)*X_1.X_3 + (-0.15773)*X_1.X_4 \\
& + (-0.05412)*X_1.X_5 + (-0.053925)*X_1.X_6 + (-0.012271)*X_1.X_7 + (0.031491)*X_1.X_8 \\
& + (-0.049098)*X_1.X_9 + (0.086307)*X_1.X_{10} + (0.16474)*X_1.X_{11} + (0.19325)*X_2.X_3 \\
& + (-0.12183)*X_2.X_4 + (0.015995)*X_2.X_5 + (-0.037162)*X_2.X_6 + (-0.014808)*X_2.X_7 \\
& + (0.074874)*X_2.X_8 + (-0.035884)*X_2.X_9 + (0.24745)*X_2.X_{10} + (0.17225)*X_2.X_{11} \\
& + (-0.37868)*X_3.X_4 + (-0.33299)*X_3.X_5 + (0.021025)*X_3.X_6 + (0.056495)*X_3.X_7 \\
& + (0.12607)*X_3.X_8 + (-0.17223)*X_3.X_9 + (0.82785)*X_3.X_{10} + (0.77393)*X_3.X_{11} \\
& + (0.71362)*X_4.X_5 + (-0.87373)*X_4.X_6 + (-0.10155)*X_4.X_7 + (-0.077912)*X_4.X_8 \\
& + (0.14298)*X_4.X_9 + (-0.68724)*X_4.X_{10} + (-1.8783)*X_4.X_{11} + (-0.68725)*X_5.X_6 \\
& + (-0.02148)*X_5.X_7 + (0.018963)*X_5.X_8 + (0.060505)*X_5.X_9 + (0.11212)*X_5.X_{10} \\
& + (-1.4211)*X_5.X_{11} + (0.16046)*X_6.X_7 + (0.003106)*X_6.X_8 + (-0.12117)*X_6.X_9 \\
& + (-1.0417)*X_6.X_{10} + (1.165)*X_6.X_{11} + (0.0020116)*X_7.X_8 + (-0.027723)*X_7.X_9 \\
& + (-0.012171)*X_7.X_{10} + (0.15211)*X_7.X_{11} + (-0.052717)*X_8.X_9 + (0.13937)*X_8.X_{10} \\
& + (0.12674)*X_8.X_{11} + (-0.21796)*X_9.X_{10} + (-0.29977)*X_9.X_{11} + (0.96009)*X_{10}.X_{11} \\
& + (0.4103)*X_3.X_3 + (0.21785)*X_4.X_4 + (1.0622)*X_6.X_6 + (1.0155)*X_{10}.X_{10} + (0.81146)*X_{11}.X_{11} \\
& + (-0.50592)*X_{10}.X_{10}.X_{10} + (0.36958)*X_{10}.X_{10}.X_{10} + (-0.015346)*X_2.X_3.X_4 \\
& + (-0.027417)*X_2.X_3.X_5 + (0.032909)*X_2.X_3.X_6 + (-0.1412)*X_2.X_3.X_{10} + (-0.037343)*X_2.X_3.X_{11} \\
& + (0.059007)*X_2.X_4.X_5 + (-0.052151)*X_2.X_4.X_6 + (0.13029)*X_2.X_4.X_{10} + (0.022262)*X_2.X_4.X_{11} \\
& + (-0.048343)*X_2.X_5.X_6 + (0.040578)*X_2.X_5.X_{10} + (0.047036)*X_2.X_5.X_{11} \\
& + (0.076903)*X_2.X_6.X_{10} + (0.074654)*X_2.X_6.X_{11} + (-0.051943)*X_2.X_{10}.X_{11} \\
& + (-0.12765)*X_3.X_4.X_5 + (-0.15554)*X_3.X_4.X_6 + (0.16871)*X_3.X_4.X_{10} + (0.062869)*X_3.X_4.X_{11} \\
& + (-0.018095)*X_3.X_5.X_6 + (0.043602)*X_3.X_5.X_{10} + (0.15673)*X_3.X_5.X_{11} + (0.25729)*X_3.X_6.X_{10} \\
& + (0.10267)*X_3.X_6.X_{11} + (-0.21905)*X_3.X_{10}.X_{11} + (-0.12525)*X_4.X_5.X_6 \\
& + (-0.031804)*X_4.X_5.X_{10} + (-0.39298)*X_4.X_5.X_{11} + (-0.29284)*X_4.X_6.X_{10} \\
& + (0.11861)*X_4.X_6.X_{11} + (0.13967)*X_4.X_{10}.X_{11} + (-0.10097)*X_5.X_6.X_{10} + (0.22729)*X_5.X_6.X_{11} \\
& + (0.063498)*X_5.X_{10}.X_{11} + (0.43054)*X_6.X_{10}.X_{11} + (-0.058013)*X_3.X_4.X_4 \\
& + (-0.039244)*X_3.X_5.X_5 + (-0.047142)*X_3.X_6.X_6 + (-0.42074)*X_3.X_{10}.X_{10} \\
& + (-0.14206)*X_3.X_{11}.X_{11} + (0.18194)*X_4.X_3.X_3 + (-0.061548)*X_4.X_5.X_5 + (0.11386)*X_4.X_6.X_6 \\
& + (0.30617)*X_4.X_{10}.X_{10} + (0.21604)*X_4.X_{11}.X_{11} + (0.1216)*X_5.X_3.X_3 + (-0.0090992)*X_5.X_4.X_4 \\
& + (0.30645)*X_5.X_6.X_6 + (-0.025415)*X_5.X_{10}.X_{10} + (0.077486)*X_5.X_{11}.X_{11} \\
& + (0.065009)*X_6.X_3.X_3 + (0.0082176)*X_6.X_4.X_4 + (0.096153)*X_6.X_5.X_5 + (0.4176)*X_6.X_{10}.X_{10} \\
& + (-0.0046577)*X_6.X_{11}.X_{11} + (-0.22026)*X_{10}.X_3.X_3 + (-0.017085)*X_{10}.X_4.X_4 \\
& + (-0.011762)*X_{10}.X_5.X_5 + (0.080181)*X_{10}.X_6.X_6 + (0.08851)*X_{10}.X_{11}.X_{11} \\
& + (-0.39594)*X_{11}.X_3.X_3 + (-0.33951)*X_{11}.X_4.X_4 + (0.075683)*X_{11}.X_5.X_5
\end{aligned} \tag{A10.12}$$

$$+ (-0.19471)*X_{11}.X_6.X_6 + (-0.36739)*X_{11}.X_{10}.X_{10}$$

Annexe A11 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle du bâtiment

Nancy

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned} \text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} = & 78.648 + (3.3065)*X_1 + (1.5744)*X_2 + (15.2988)*X_3 \\ & + (-0.92139)*X_4 + (6.1033)*X_5 + (-1.5337)*X_6 + (0.65196)*X_7 + (2.9865)*X_8 + (3.6212)*X_9 \\ & + (0.19841)*X_{10} + (-1.4974)*X_{11} + (-27.3494)*X_{12} + (-1.8287)*X_{13} + (0.31837)*X_3.X_5 \\ & + (-0.77089)*X_3.X_4 + (0.63103)*X_3.X_{10} + (-0.76784)*X_{10}.X_6 + (1.152)*X_{10}.X_9 \\ & + (1.6238)*X_{10}.X_{11} + (1.3358)*X_{10}.X_5 + (-3.3013)*X_{10}.X_4 + (-1.6827)*X_{11}.X_5 \\ & + (-0.26025)*X_{11}.X_4 + (-9.3345)*X_{11}.X_7 + (-2.3159)*X_7.X_5 + (-0.48033)*X_7.X_4 \\ & + (0.34302)*X_4.X_5 \end{aligned} \quad (A11.1)$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned} \text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} = & 78.753 + (2.7522)*X_1 + (3.0299)*X_2 + (15.062)*X_3 \\ & + (-0.87595)*X_4 + (6.2688)*X_5 + (-1.5418)*X_6 + (0.77511)*X_7 + (2.9997)*X_8 + (3.9486)*X_9 \\ & + (-0.1335)*X_{10} + (-1.7173)*X_{11} + (-26.7568)*X_{12} + (-1.9793)*X_{13} + (-2.039)*X_1.X_{12} \\ & + (0.25845)*X_{12}.X_6 + (0.019022)*X_{12}.X_{11} + (-3.3233)*X_{12}.X_5 + (1.2774)*X_{12}.X_4 \\ & + (-1.9451)*X_{12}.X_2 + (-9.8167)*X_{12}.X_3 + (0.49097)*X_{13}.X_3 + (0.5766)*X_{13}.X_{10} \\ & + (1.0102)*X_{13}.X_6 + (1.0985)*X_{13}.X_{11} + (0.43357)*X_{11}.X_6 + (0.4508)*X_{11}.X_{10} \\ & + (-0.33382)*X_{11}.X_7 + (0.44314)*X_{11}.X_3 + (0.23015)*X_{11}.X_4 + (-0.072675)*X_{10}.X_6 \\ & + (-0.22939)*X_{10}.X_9 + (-0.50217)*X_{10}.X_5 + (-0.19646)*X_{10}.X_4 + (0.39683)*X_{10}.X_3 \\ & + (-0.32378)*X_9.X_6 + (-0.066129)*X_9.X_3 + (0.069183)*X_8.X_6 + (-0.24538)*X_7.X_6 \\ & + (0.029915)*X_7.X_5 + (0.34793)*X_7.X_4 + (-1.7984)*X_7.X_3 + (0.27389)*X_6.X_3 + (-0.25209)*X_6.X_2 \\ & + (-0.68961)*X_6.X_4 + (-0.62443)*X_6.X_5 + (2.3669)*X_5.X_3 + (-0.12069)*X_5.X_2 + (-0.8947)*X_4.X_3 \\ & + (-0.30932)*X_4.X_2 + (0.37361)*X_3.X_2 \end{aligned} \quad (A11.2)$$

• Plan D-optimaux

$$\begin{aligned} \text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} = & 61.9258 + (2.604)*X_1 + (3.0876)*X_2 + (14.6109)*X_3 \\ & + (-1.2796)*X_4 + (6.1976)*X_5 + (-1.7687)*X_6 + (0.10491)*X_7 + (2.15)*X_8 + (3.4408)*X_9 \\ & + (0.26185)*X_{10} + (-1.8286)*X_{11} + (-26.5528)*X_{12} + (-1.6354)*X_{13} + (-0.0044391)*X_1.X_2 \\ & + (0.27305)*X_1.X_3 + (0.14213)*X_1.X_4 + (0.10902)*X_1.X_5 + (0.28616)*X_1.X_6 + (-0.32648)*X_1.X_7 \\ & + (-0.56498)*X_1.X_8 + (-0.058441)*X_1.X_9 + (0.7341)*X_1.X_{10} + (0.016905)*X_1.X_{11} \\ & + (-1.8677)*X_1.X_{12} + (0.01821)*X_1.X_{13} + (0.76751)*X_2.X_3 + (-0.35187)*X_2.X_4 \\ & + (0.42523)*X_2.X_5 + (-0.049775)*X_2.X_6 + (-0.55684)*X_2.X_7 + (-0.15318)*X_2.X_8 \\ & + (-0.40721)*X_2.X_9 + (-0.65084)*X_2.X_{10} + (-0.23716)*X_2.X_{11} + (-2.5767)*X_2.X_{12} \\ & + (0.10989)*X_2.X_{13} + (-1.9248)*X_3.X_4 + (2.9485)*X_3.X_5 + (-0.044449)*X_3.X_6 + (-0.68458)*X_3.X_7 \\ & + (-0.28337)*X_3.X_8 + (-0.78515)*X_3.X_9 + (0.33825)*X_3.X_{10} + (0.077336)*X_3.X_{11} \\ & + (-10.1522)*X_3.X_{12} + (0.64142)*X_3.X_{13} + (-0.14744)*X_4.X_5 + (-0.84958)*X_4.X_6 \\ & + (-0.095303)*X_4.X_7 + (0.069201)*X_4.X_8 + (0.45036)*X_4.X_9 + (-0.22496)*X_4.X_{10} \\ & + (-0.29185)*X_4.X_{11} + (1.6329)*X_4.X_{12} + (-0.935)*X_4.X_{13} + (-0.21319)*X_5.X_6 + \\ & (0.040806)*X_5.X_7 + (0.4153)*X_5.X_8 + (0.68461)*X_5.X_9 + (-0.26612)*X_5.X_{10} + (-0.97893)*X_5.X_{11} \\ & + (-2.8263)*X_5.X_{12} + (0.0077758)*X_5.X_{13} + (0.61919)*X_6.X_7 + (0.11516)*X_6.X_8 \\ & + (0.24642)*X_6.X_9 + (0.3867)*X_6.X_{10} + (0.47462)*X_6.X_{11} + (0.48374)*X_6.X_{12} \\ & + (0.94622)*X_6.X_{13} + (-0.22657)*X_7.X_8 + (-0.0042238)*X_7.X_9 + (-0.094821)*X_7.X_{10} \\ & + (-0.18269)*X_7.X_{11} + (0.13899)*X_7.X_{12} + (-0.040856)*X_7.X_{13} + (0.23405)*X_8.X_9 \\ & + (0.90172)*X_8.X_{10} + (-0.17532)*X_8.X_{11} + (-1.4688)*X_8.X_{12} + (-0.58367)*X_8.X_{13} \\ & + (0.41497)*X_9.X_{10} + (-0.41064)*X_9.X_{11} + (0.59094)*X_9.X_{12} + (0.38037)*X_9.X_{13} \\ & + (-0.66982)*X_{10}.X_{11} + (0.25132)*X_{10}.X_{12} + (0.64479)*X_{10}.X_{13} + (-0.32718)*X_{11}.X_{12} \\ & + (0.58336)*X_{11}.X_{13} + (-0.51643)*X_{12}.X_{13} + (-0.0075342)*X_1^2 + (-1.6701)*X_2^2 + (2.5989)*X_3^2 \\ & + (-1.7881)*X_4^2 + (-0.18922)*X_5^2 + (2.5299)*X_6^2 + (-2.2971)*X_7^2 + (1.1836)*X_8^2 + (1.7112)*X_9^2 \\ & + (-0.57641)*X_{10}^2 + (-0.95855)*X_{11}^2 + (12.9471)*X_{12}^2 + (3.4533)*X_{13}^2 \end{aligned} \quad (A11.3)$$

• Plan de couplage : plan $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi + deux plans $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi (A11.4)

$$\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} = 59.9884 + (2.7903)*X_1 + (3.0472)*X_2 + (9.5863)*X_3$$

$$\begin{aligned}
& + (-0.86717)*X_4 + (3.5036)*X_5 + (-0.98183)*X_6 + (0.89713)*X_7 + (2.7804)*X_8 + (3.9549)*X_9 \\
& + (0.070644)*X_{10} + (-1.4941)*X_{11} + (-15.978)*X_{12} + (-0.2769)*X_{13} + (0.040128)*X_{1.X2} \\
& + (0.24134)*X_{1.X3} + (-0.078755)*X_{1.X4} + (-0.56162)*X_{1.X5} + (0.033589)*X_{1.X6} \\
& + (-0.092323)*X_{1.X7} + (-0.0064045)*X_{1.X8} + (0.0047659)*X_{1.X9} + (0.10846)*X_{1.X10} \\
& + (0.17482)*X_{1.X11} + (-1.968)*X_{1.X12} + (0.17701)*X_{1.X13} + (0.12194)*X_{2.X3} \\
& + (-0.19779)*X_{2.X4} + (-0.058959)*X_{2.X5} + (-0.063568)*X_{2.X6} + (0.16125)*X_{2.X7} \\
& + (-0.071089)*X_{2.X8} + (-0.058363)*X_{2.X9} + (0.084258)*X_{2.X10} + (-0.010419)*X_{2.X11} \\
& + (-2.1801)*X_{2.X12} + (0.1449)*X_{2.X13} + (-0.59898)*X_{3.X4} + (0.71428)*X_{3.X5} + (0.11462)*X_{3.X6} \\
& + (-0.0019725)*X_{3.X7} + (0.078917)*X_{3.X8} + (-0.18364)*X_{3.X9} + (0.29046)*X_{3.X10} \\
& + (0.27767)*X_{3.X11} + (-9.7028)*X_{3.X12} + (0.42969)*X_{3.X13} + (-0.15323)*X_{4.X5} \\
& + (-0.61591)*X_{4.X6} + (0.25931)*X_{4.X7} + (0.022376)*X_{4.X8} + (-0.0059124)*X_{4.X9} \\
& + (-0.086179)*X_{4.X10} + (-0.36306)*X_{4.X11} + (1.3102)*X_{4.X12} + (-0.54129)*X_{4.X13} \\
& + (-0.41815)*X_{5.X6} + (0.046359)*X_{5.X7} + (0.10384)*X_{5.X8} + (-0.050884)*X_{5.X9} \\
& + (-0.017159)*X_{5.X10} + (-0.35639)*X_{5.X11} + (-3.3631)*X_{5.X12} + (-0.27462)*X_{5.X13} \\
& + (-0.17246)*X_{6.X7} + (-0.047711)*X_{6.X8} + (-0.16706)*X_{6.X9} + (0.054576)*X_{6.X10} \\
& + (0.38819)*X_{6.X11} + (0.16403)*X_{6.X12} + (1.03)*X_{6.X13} + (-0.15412)*X_{7.X8} + (0.16069)*X_{7.X9} \\
& + (-0.060799)*X_{7.X10} + (0.053146)*X_{7.X11} + (-0.52564)*X_{7.X12} + (-0.043218)*X_{7.X13} \\
& + (-0.18808)*X_{8.X9} + (-0.04624)*X_{8.X10} + (0.11397)*X_{8.X11} + (-1.7498)*X_{8.X12} \\
& + (-0.075464)*X_{8.X13} + (0.061733)*X_{9.X10} + (0.014936)*X_{9.X11} + (1.2425)*X_{9.X12} \\
& + (-0.0086311)*X_{9.X13} + (0.14821)*X_{10.X11} + (0.062956)*X_{10.X12} + (0.5518)*X_{10.X13} \\
& + (-0.0029005)*X_{11.X12} + (0.75988)*X_{11.X13} + (-0.037156)*X_{12.X13} + (-0.22743)*X_{3.X3} \\
& + (1.5465)*X_{6.X6} + (0.49803)*X_{10.X10} + (0.073794)*X_{11.X11} + (9.861)*X_{12.X12} \\
& + (0.6459)*X_{13.X13} + (-10.044)*X_{12.X12} + (-1.1182)*X_{13.X13} \\
& + (6.1951)*X_{12.X12} + (0.01711)*X_{13.X13} + (0.24991)*X_{3.X5} \\
& + (-1.8357)*X_{3.X5} + (-0.069995)*X_{3.X5} + (-0.15209)*X_{3.X6} + (-0.48408)*X_{3.X6} \\
& + (0.11519)*X_{3.X12} + (0.23672)*X_{5.X6} + (0.23437)*X_{5.X6} + (0.19264)*X_{5.X12} \\
& + (-0.019125)*X_{6.X12} + (0.36103)*X_{3.X5} + (-0.26352)*X_{3.X6} + (5.9209)*X_{3.X12} \\
& + (-0.47946)*X_{3.X13} + (0.40579)*X_{5.X3} + (-0.0016118)*X_{5.X6} + (2.1284)*X_{5.X12} \\
& + (0.14263)*X_{5.X13} + (-0.62856)*X_{6.X3} + (0.69508)*X_{6.X5} + (-0.091262)*X_{6.X12} \\
& + (-0.63378)*X_{6.X13} + (0.20667)*X_{12.X3} + (-0.22123)*X_{12.X5} \\
& + (-0.87842)*X_{12.X6} + (-0.054659)*X_{12.X13} + (-0.35347)*X_{13.X3} \\
& + (-0.032081)*X_{13.X5} + (-0.27486)*X_{13.X6} + (0.19415)*X_{13.X12} \\
& + (-0.049437)*X_{3.X5} + (2.3673)*X_{3.X5} + (0.17559)*X_{3.X6} \\
& + (-0.24653)*X_{5.X6}
\end{aligned}$$

Agen

- **Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$**

$$\begin{aligned}
\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} &= 61.316 + (2.3129)*X_1 + (0.8599)*X_2 + (9.0761)*X_3 + (0.29322)*X_4 \\
&+ (4.2795)*X_5 + (-2.8909)*X_6 + (0.43237)*X_7 + (1.4095)*X_8 + (4.4901)*X_9 + (0.081105)*X_{10} \\
&+ (-2.749)*X_{11} + (-15.2966)*X_{12} + (-3.348)*X_{13} + (-0.53516)*X_{3.X5} + (-1.0944)*X_{3.X4} \\
&+ (0.96708)*X_{3.X10} + (-0.80832)*X_{10.X6} + (1.6153)*X_{10.X9} + (1.3864)*X_{10.X11} \\
&+ (1.1269)*X_{10.X5} + (-2.1456)*X_{10.X4} + (-0.83074)*X_{11.X5} + (-0.60715)*X_{11.X4} \\
&+ (-5.3635)*X_{11.X7} + (-1.6906)*X_{7.X5} + (-0.64884)*X_{7.X4} + (0.62682)*X_{4.X5}
\end{aligned} \tag{A11.5}$$

- **Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$**

$$\begin{aligned}
\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} &= 61.441 + (1.4188)*X_1 + (1.4091)*X_2 + (8.6593)*X_3 + (0.26598)*X_4 \\
&+ (4.4486)*X_5 + (-2.9032)*X_6 + (0.78217)*X_7 + (1.5053)*X_8 + (4.6036)*X_9 + (-0.30293)*X_{10} \\
&+ (-3.071)*X_{11} + (-14.4632)*X_{12} + (-3.4988)*X_{13} + (-1.4638)*X_{1.X12} + (0.66983)*X_{12.X6} \\
&+ (-0.030509)*X_{12.X11} + (-2.0309)*X_{12.X5} + (0.98633)*X_{12.X4} + (-1.1446)*X_{12.X2} \\
&+ (-6.3952)*X_{12.X3} + (0.83379)*X_{13.X3} + (1.027)*X_{13.X10} + (1.4655)*X_{13.X6} \\
&+ (1.9352)*X_{13.X11} + (0.58835)*X_{11.X6} + (0.70899)*X_{11.X10} + (-0.43958)*X_{11.X7} \\
&+ (0.53794)*X_{11.X3} + (-0.2305)*X_{11.X4} + (-0.29537)*X_{10.X6} + (-0.24457)*X_{10.X9} \\
&+ (-0.50622)*X_{10.X5} + (-0.32264)*X_{10.X4} + (0.57099)*X_{10.X3} + (-0.35203)*X_{9.X6} \\
&+ (-0.044743)*X_{9.X3} + (0.025589)*X_{8.X6} + (-0.42265)*X_{7.X6} + (-0.032568)*X_{7.X5} \\
&+ (0.38815)*X_{7.X4} + (-0.85021)*X_{7.X3} + (0.17176)*X_{6.X3} + (-0.38058)*X_{6.X2} + (-0.8451)*X_{6.X4} \\
&+ (-0.78019)*X_{6.X5} + (0.72487)*X_{5.X3} + (-0.10949)*X_{5.X2} + (-1.1713)*X_{4.X3} + (-0.34235)*X_{4.X2} \\
&+ (0.39349)*X_{3.X2}
\end{aligned} \tag{A11.6}$$

- **Plan D-optimaux**

$$\begin{aligned}
\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} &= 49.4371 + (1.2754)*X_1 + (1.6016)*X_2 + (8.4336)*X_3 \\
&+ (-0.10982)*X_4 + (4.3035)*X_5 + (-2.9181)*X_6 + (0.32546)*X_7 + (0.75438)*X_8 + (4.2998)*X_9 \\
&+ (0.054032)*X_{10} + (-3.0056)*X_{11} + (-14.311)*X_{12} + (-3.2062)*X_{13} + (-0.18067)*X_{1.X2}
\end{aligned} \tag{A11.7}$$

$$\begin{aligned}
& + (0.21943)*X1.X3 + (0.09231)*X1.X4 + (0.039733)*X1.X5 + (0.25546)*X1.X6 + (-0.2319)*X1.X7 \\
& + (-0.34877)*X1.X8 + (-0.29024)*X1.X9 + (0.58535)*X1.X10 + (0.024256)*X1.X11 \\
& + (-1.3489)*X1.X12 + (0.01549)*X1.X13 + (0.7872)*X2.X3 + (-0.37316)*X2.X4 + (0.1656)*X2.X5 \\
& + (-0.075665)*X2.X6 + (-0.37542)*X2.X7 + (-0.22658)*X2.X8 + (-0.21491)*X2.X9 \\
& + (-0.28275)*X2.X10 + (-0.18298)*X2.X11 + (-1.8138)*X2.X12 + (0.26372)*X2.X13 \\
& + (-1.721)*X3.X4 + (1.7208)*X3.X5 + (-0.10507)*X3.X6 + (-0.60354)*X3.X7 + (-0.34272)*X3.X8 \\
& + (-0.76658)*X3.X9 + (0.27579)*X3.X10 + (0.46331)*X3.X11 + (-6.5533)*X3.X12 \\
& + (0.92926)*X3.X13 + (0.051674)*X4.X5 + (-0.89214)*X4.X6 + (0.062762)*X4.X7 \\
& + (0.16264)*X4.X8 + (0.37921)*X4.X9 + (-0.20453)*X4.X10 + (-0.69266)*X4.X11 \\
& + (1.365)*X4.X12 + (-1.2603)*X4.X13 + (-0.57368)*X5.X6 + (-0.080525)*X5.X7 + (0.36116)*X5.X8 \\
& + (0.40189)*X5.X9 + (-0.20241)*X5.X10 + (-1.0029)*X5.X11 + (-1.6646)*X5.X12 \\
& + (-0.17029)*X5.X13 + (0.61653)*X6.X7 + (0.079613)*X6.X8 + (0.063896)*X6.X9 \\
& + (0.15641)*X6.X10 + (0.65316)*X6.X11 + (0.84418)*X6.X12 + (1.3868)*X6.X13 \\
& + (-0.1054)*X7.X8 + (0.070658)*X7.X9 + (-0.20008)*X7.X10 + (-0.27139)*X7.X11 \\
& + (0.05525)*X7.X12 + (0.081439)*X7.X13 + (0.085902)*X8.X9 + (0.71311)*X8.X10 \\
& + (-0.044734)*X8.X11 + (-0.79321)*X8.X12 + (-0.45872)*X8.X13 + (0.28937)*X9.X10 \\
& + (-0.40776)*X9.X11 + (0.27877)*X9.X12 + (0.090563)*X9.X13 + (-0.31024)*X10.X11 \\
& + (0.049929)*X10.X12 + (1.1195)*X10.X13 + (-0.35931)*X11.X12 + (1.2809)*X11.X13 \\
& + (-0.49732)*X12.X13 + (-0.45593)*X1^2 + (-1.8587)*X2^2 + (2.9216)*X3^2 + (-1.3404)*X4^2 \\
& + (0.48279)*X5^2 + (2.1479)*X6^2 + (-1.597)*X7^2 + (1.1416)*X8^2 + (1.3997)*X9^2 + (-0.11923)*X10^2 \\
& + (-0.89315)*X11^2 + (6.4922)*X12^2 + (3.8743)*X13^2
\end{aligned}$$

• **Plan de couplage : plan $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi + deux plans $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi**

$$\begin{aligned}
\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} &= 48.6627 + (1.6169)*X1 + (1.6972)*X2 + (5.5952)*X3 \\
& + (0.12139)*X4 + (2.2142)*X5 + (-2.2731)*X6 + (0.88801)*X7 + (1.2714)*X8 + (4.6234)*X9 \\
& + (-0.09186)*X10 + (-2.7406)*X11 + (-8.637)*X12 + (-0.89791)*X13 + (0.1294)*X1.X2 \\
& + (0.31914)*X1.X3 + (-0.13837)*X1.X4 + (-0.44835)*X1.X5 + (-0.034163)*X1.X6 \\
& + (-0.036812)*X1.X7 + (0.081831)*X1.X8 + (-0.0045849)*X1.X9 + (0.1993)*X1.X10 \\
& + (0.15844)*X1.X11 + (-1.3126)*X1.X12 + (0.15985)*X1.X13 + (0.082687)*X2.X3 \\
& + (-0.15629)*X2.X4 + (-0.080539)*X2.X5 + (-0.058536)*X2.X6 + (0.24307)*X2.X7 \\
& + (-0.045685)*X2.X8 + (-0.07666)*X2.X9 + (0.067954)*X2.X10 + (0.013101)*X2.X11 \\
& + (-1.3483)*X2.X12 + (0.23256)*X2.X13 + (-0.60144)*X3.X4 + (0.37319)*X3.X5 \\
& + (0.063236)*X3.X6 + (0.033708)*X3.X7 + (0.10531)*X3.X8 + (-0.25818)*X3.X9 \\
& + (0.44624)*X3.X10 + (0.35078)*X3.X11 + (-6.1939)*X3.X12 + (0.6603)*X3.X13 \\
& + (-0.0031659)*X4.X5 + (-0.75465)*X4.X6 + (0.28058)*X4.X7 + (-0.00059905)*X4.X8 \\
& + (0.0089048)*X4.X9 + (-0.16068)*X4.X10 + (-0.62829)*X4.X11 + (1.1155)*X4.X12 \\
& + (-1.0504)*X4.X13 + (-0.73196)*X5.X6 + (0.060243)*X5.X7 + (0.041197)*X5.X8 \\
& + (-0.1185)*X5.X9 + (-0.11675)*X5.X10 + (-0.59033)*X5.X11 + (-2.0605)*X5.X12 \\
& + (-0.52268)*X5.X13 + (-0.20825)*X6.X7 + (-0.09396)*X6.X8 + (-0.16973)*X6.X9 \\
& + (-0.16241)*X6.X10 + (0.56955)*X6.X11 + (0.59816)*X6.X12 + (1.5169)*X6.X13 \\
& + (-0.19662)*X7.X8 + (0.12811)*X7.X9 + (-0.06193)*X7.X10 + (-0.04892)*X7.X11 \\
& + (-0.43022)*X7.X12 + (-0.070281)*X7.X13 + (-0.17558)*X8.X9 + (0.027846)*X8.X10 \\
& + (0.05464)*X8.X11 + (-0.83586)*X8.X12 + (-0.13879)*X8.X13 + (0.0099525)*X9.X10 \\
& + (-0.039228)*X9.X11 + (0.89191)*X9.X12 + (-0.13212)*X9.X13 + (0.38789)*X10.X11 \\
& + (0.030892)*X10.X12 + (1.0436)*X10.X13 + (-0.04789)*X11.X12 + (1.5375)*X11.X13 \\
& + (-0.038765)*X12.X13 + (0.046455)*X3.X3 + (1.4575)*X6.X6 + (0.79983)*X10.X10 \\
& + (0.14358)*X11.X11 + (6.0463)*X12.X12 + (1.5772)*X13.X13 + (-4.9883)*X12.X12.X12 \\
& + (-1.6165)*X13.X13.X13 + (2.6221)*X12.X12.X12.X12 + (-0.098419)*X13.X13.X13.X13 \\
& + (0.26566)*X3.X5.X6 + (-1.109)*X3.X5.X12 + (0.090048)*X3.X5.X13 + (-0.021568)*X3.X6.X12 \\
& + (-0.42706)*X3.X6.X13 + (0.22002)*X3.X12.X13 + (0.25833)*X5.X6.X12 + (0.29073)*X5.X6.X13 \\
& + (0.29959)*X5.X12.X13 + (-0.015941)*X6.X12.X13 + (0.20981)*X3.X5.X5 + (-0.4844)*X3.X6.X6 \\
& + (3.9452)*X3.X12.X12 + (-0.49329)*X3.X13.X13 + (0.43606)*X5.X3.X3 + (0.21253)*X5.X6.X6 \\
& + (1.4788)*X5.X12.X12 + (0.0014618)*X5.X13.X13 + (-0.34452)*X6.X3.X3 + (0.4486)*X6.X5.X5 \\
& + (-0.25506)*X6.X12.X12 + (-0.66989)*X6.X13.X13 + (0.13071)*X12.X3.X3 \\
& + (-0.37772)*X12.X5.X5 + (-0.87116)*X12.X6.X6 + (-0.019376)*X12.X13.X13 \\
& + (-0.25755)*X13.X3.X3 + (-0.18011)*X13.X5.X5 + (-0.48355)*X13.X6.X6 \\
& + (0.10005)*X13.X12.X12 + (-0.083498)*X3.X5.X6.X6 + (1.5595)*X3.X5.X12.X12 \\
& + (0.14409)*X3.X6.X12.X12 + (-0.1046)*X5.X6.X12.X12
\end{aligned} \tag{A11.8}$$

Nice

• **Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$** (A11.9)

$$\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} = 54.954 + (1.7218)*X1 + (0.29087)*X2 + (4.2091)*X3 + (1.8076)*X4$$

$$\begin{aligned}
& + (3.1398)*X_5 + (-3.3059)*X_6 + (0.35478)*X_7 + (1.3165)*X_8 + (5.1977)*X_9 + (0.13221)*X_{10} \\
& + (-4.7948)*X_{11} + (-7.9462)*X_{12} + (-6.4378)*X_{13} + (-1.3647)*X_3.X_5 + (-1.4286)*X_3.X_4 \\
& + (0.92054)*X_3.X_{10} + (-0.88687)*X_{10}.X_6 + (1.9381)*X_{10}.X_9 + (1.0136)*X_{10}.X_{11} \\
& + (0.77969)*X_{10}.X_5 + (-1.1077)*X_{10}.X_4 + (-1.2118)*X_{11}.X_5 + (-1.176)*X_{11}.X_4 \\
& + (-2.1636)*X_{11}.X_7 + (-1.037)*X_7.X_5 + (-0.72077)*X_7.X_4 + (0.99654)*X_4.X_5
\end{aligned}$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned}
\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} &= 54.9807 + (0.38166)*X_1 + (0.49795)*X_2 + (3.8246)*X_3 \\
& + (1.7433)*X_4 + (3.4004)*X_5 + (-3.3457)*X_6 + (0.72989)*X_7 + (1.3506)*X_8 + (5.3387)*X_9 \\
& + (-0.063724)*X_{10} + (-5.0123)*X_{11} + (-7.1037)*X_{12} + (-6.6957)*X_{13} + (-0.98938)*X_1.X_{12} \\
& + (0.68515)*X_{12}.X_6 + (0.03968)*X_{12}.X_{11} + (-1.0444)*X_{12}.X_5 + (0.68686)*X_{12}.X_4 \\
& + (-0.67369)*X_{12}.X_2 + (-3.5522)*X_{12}.X_3 + (1.2123)*X_{13}.X_3 + (1.173)*X_{13}.X_{10} \\
& + (1.5645)*X_{13}.X_6 + (3.1025)*X_{13}.X_{11} + (0.58361)*X_{11}.X_6 + (0.62592)*X_{11}.X_{10} \\
& + (-0.21482)*X_{11}.X_7 + (0.66002)*X_{11}.X_3 + (-0.79862)*X_{11}.X_4 + (-0.50673)*X_{10}.X_6 \\
& + (-0.16243)*X_{10}.X_9 + (-0.4092)*X_{10}.X_5 + (-0.24286)*X_{10}.X_4 + (0.47666)*X_{10}.X_3 \\
& + (-0.2425)*X_9.X_6 + (-0.038267)*X_9.X_3 + (-0.012544)*X_8.X_6 + (-0.60146)*X_7.X_6 \\
& + (-0.01268)*X_7.X_5 + (0.29919)*X_7.X_4 + (-0.73639)*X_7.X_3 + (0.063396)*X_6.X_3 + (-0.2556)*X_6.X_2 \\
& + (-0.68315)*X_6.X_4 + (-0.70392)*X_6.X_5 + (-0.79979)*X_5.X_3 + (-0.094464)*X_5.X_2 \\
& + (-1.5022)*X_4.X_3 + (-0.2617)*X_4.X_2 + (0.26435)*X_3.X_2
\end{aligned} \tag{A11.10}$$

• Plan D-optimaux

$$\begin{aligned}
\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} &= 44.7201 + (0.43172)*X_1 + (0.5554)*X_2 + (3.9492)*X_3 \\
& + (1.4751)*X_4 + (3.1122)*X_5 + (-3.3712)*X_6 + (0.41328)*X_7 + (0.70706)*X_8 + (5.2233)*X_9 \\
& + (0.19521)*X_{10} + (-4.7191)*X_{11} + (-6.775)*X_{12} + (-6.4056)*X_{13} + (-0.34698)*X_1.X_2 \\
& + (0.039512)*X_1.X_3 + (0.049105)*X_1.X_4 + (0.0056195)*X_1.X_5 + (0.15334)*X_1.X_6 \\
& + (-0.24853)*X_1.X_7 + (-0.14774)*X_1.X_8 + (-0.32746)*X_1.X_9 + (0.46358)*X_1.X_{10} \\
& + (0.078927)*X_1.X_{11} + (-0.90035)*X_1.X_{12} + (-0.040732)*X_1.X_{13} + (0.74938)*X_2.X_3 \\
& + (-0.33018)*X_2.X_4 + (-0.12037)*X_2.X_5 + (-0.063126)*X_2.X_6 + (-0.24917)*X_2.X_7 \\
& + (-0.33211)*X_2.X_8 + (0.014368)*X_2.X_9 + (-0.018929)*X_2.X_{10} + (-0.14036)*X_2.X_{11} \\
& + (-1.073)*X_2.X_{12} + (0.32806)*X_2.X_{13} + (-1.3788)*X_3.X_4 + (0.79276)*X_3.X_5 + (-0.036273)*X_3.X_6 \\
& + (-0.40253)*X_3.X_7 + (-0.25652)*X_3.X_8 + (-0.59677)*X_3.X_9 + (0.02148)*X_3.X_{10} \\
& + (0.74975)*X_3.X_{11} + (-3.7391)*X_3.X_{12} + (0.99428)*X_3.X_{13} + (0.20546)*X_4.X_5 \\
& + (-0.84445)*X_4.X_6 + (0.003061)*X_4.X_7 + (0.19501)*X_4.X_8 + (0.26601)*X_4.X_9 \\
& + (-0.056577)*X_4.X_{10} + (-1.2334)*X_4.X_{11} + (1.1677)*X_4.X_{12} + (-1.885)*X_4.X_{13} \\
& + (-0.84674)*X_5.X_6 + (-0.18971)*X_5.X_7 + (0.4325)*X_5.X_8 + (0.17554)*X_5.X_9 \\
& + (-0.030536)*X_5.X_{10} + (-1.1964)*X_5.X_{11} + (-0.71849)*X_5.X_{12} + (-0.50706)*X_5.X_{13} \\
& + (0.57528)*X_6.X_7 + (0.083743)*X_6.X_8 + (-0.067718)*X_6.X_9 + (-0.1064)*X_6.X_{10} \\
& + (0.8113)*X_6.X_{11} + (0.6585)*X_6.X_{12} + (1.6138)*X_6.X_{13} + (-0.10988)*X_7.X_8 + (0.17688)*X_7.X_9 \\
& + (-0.1866)*X_7.X_{10} + (-0.064553)*X_7.X_{11} + (-0.068169)*X_7.X_{12} + (0.35741)*X_7.X_{13} \\
& + (-0.073493)*X_8.X_9 + (0.66158)*X_8.X_{10} + (0.072704)*X_8.X_{11} + (-1.0419)*X_8.X_{12} \\
& + (-0.30734)*X_8.X_{13} + (0.25395)*X_9.X_{10} + (-0.4891)*X_9.X_{11} + (0.24364)*X_9.X_{12} \\
& + (-0.16613)*X_9.X_{13} + (-0.1394)*X_{10}.X_{11} + (-0.12727)*X_{10}.X_{12} + (1.3599)*X_{10}.X_{13} \\
& + (-0.33046)*X_{11}.X_{12} + (2.352)*X_{11}.X_{13} + (-0.38699)*X_{12}.X_{13} + (-0.58029)*X_1^2 + (-1.7646)*X_2^2 \\
& + (2.6932)*X_3^2 + (-0.90133)*X_4^2 + (0.49376)*X_5^2 + (1.6306)*X_6^2 + (-1.2308)*X_7^2 + (1.451)*X_8^2 \\
& + (1.3566)*X_9^2 + (0.12973)*X_{10}^2 + (-0.99097)*X_{11}^2 + (2.6716)*X_{12}^2 + (5.3)*X_{13}^2
\end{aligned} \tag{A11.11}$$

• Plan de couplage : plan $L_{32}(2^{31})$ de Taguchi + deux plans $L_{81}(3^{40})$ de Taguchi

$$\begin{aligned}
\text{Energie finale (kWh/m}^2\text{.an)} &= 44.5173 + (0.70666)*X_1 + (0.80775)*X_2 + (2.7477)*X_3 \\
& + (1.4214)*X_4 + (1.3117)*X_5 + (-2.9331)*X_6 + (0.86429)*X_7 + (1.1516)*X_8 + (5.3197)*X_9 \\
& + (0.13514)*X_{10} + (-4.4955)*X_{11} + (-4.071)*X_{12} + (-2.8215)*X_{13} + (0.073323)*X_1.X_2 \\
& + (0.34485)*X_1.X_3 + (-0.17494)*X_1.X_4 + (-0.38099)*X_1.X_5 + (-0.078763)*X_1.X_6 \\
& + (0.0074314)*X_1.X_7 + (0.11992)*X_1.X_8 + (-0.047002)*X_1.X_9 + (0.15848)*X_1.X_{10} \\
& + (0.18745)*X_1.X_{11} + (-0.76042)*X_1.X_{12} + (0.077928)*X_1.X_{13} + (-0.018932)*X_2.X_3 \\
& + (-0.050476)*X_2.X_4 + (-0.12877)*X_2.X_5 + (-0.043727)*X_2.X_6 + (0.32156)*X_2.X_7 \\
& + (0.030684)*X_2.X_8 + (-0.031908)*X_2.X_9 + (0.078536)*X_2.X_{10} + (-0.030645)*X_2.X_{11} \\
& + (-0.70792)*X_2.X_{12} + (0.15146)*X_2.X_{13} + (-0.44872)*X_3.X_4 + (-0.10016)*X_3.X_5 \\
& + (0.1561)*X_3.X_6 + (0.13315)*X_3.X_7 + (0.23333)*X_3.X_8 + (-0.2831)*X_3.X_9 + (0.43527)*X_3.X_{10} \\
& + (0.52764)*X_3.X_{11} + (-3.368)*X_3.X_{12} + (0.7908)*X_3.X_{13} + (0.23074)*X_4.X_5 + (-0.65092)*X_4.X_6 \\
& + (0.19779)*X_4.X_7 + (-0.033563)*X_4.X_8 + (-0.045956)*X_4.X_9 + (-0.085737)*X_4.X_{10} \\
& + (-1.034)*X_4.X_{11} + (0.86206)*X_4.X_{12} + (-1.7078)*X_4.X_{13} + (-0.68851)*X_5.X_6 \\
& + (0.0017746)*X_5.X_7 + (0.002342)*X_5.X_8 + (-0.21754)*X_5.X_9 + (-0.064758)*X_5.X_{10} \\
& + (-0.98096)*X_5.X_{11} + (-1.0944)*X_5.X_{12} + (-0.98189)*X_5.X_{13} + (-0.26193)*X_6.X_7 \\
& + (-0.11175)*X_6.X_8 + (-0.085533)*X_6.X_9 + (-0.34658)*X_6.X_{10} + (0.58615)*X_6.X_{11} \\
& + (0.65059)*X_6.X_{12} + (1.6398)*X_6.X_{13} + (-0.20159)*X_7.X_8 + (-0.041293)*X_7.X_9 \\
& + (0.04486)*X_7.X_{10} + (0.11296)*X_7.X_{11} + (-0.49169)*X_7.X_{12} + (-0.030869)*X_7.X_{13} \\
& + (-0.25413)*X_8.X_9 + (0.10554)*X_8.X_{10} + (0.10445)*X_8.X_{11} + (-0.86093)*X_8.X_{12} \\
& + (-0.16357)*X_8.X_{13} + (0.093129)*X_9.X_{10} + (-0.065059)*X_9.X_{11} + (0.57278)*X_9.X_{12}
\end{aligned} \tag{A11.12}$$

$$\begin{aligned}
 &+ (-0.32424)*X9.X13 + (0.41237)*X10.X11 + (0.074887)*X10.X12 + (1.2695)*X10.X13 \\
 &+ (0.067061)*X11.X12 + (2.6608)*X11.X13 + (0.014154)*X12.X13 + (0.22087)*X3.X3 \\
 &+ (1.3383)*X6.X6 + (0.70957)*X10.X10 + (0.35344)*X11.X11 + (3.3396)*X12.X12 \\
 &+ (2.7478)*X13.X13 + (-2.0356)*X12.X12.X12 + (-2.9091)*X13.X13.X13 \\
 &+ (0.85263)*X12.X12.X12.X12 + (0.7447)*X13.X13.X13.X13 + (0.26537)*X3.X5.X6 \\
 &+ (-0.61601)*X3.X5.X12 + (0.24537)*X3.X5.X13 + (-0.012497)*X3.X6.X12 \\
 &+ (-0.37492)*X3.X6.X13 + (0.12741)*X3.X12.X13 + (0.39422)*X5.X6.X12 + (0.34708)*X5.X6.X13 \\
 &+ (0.33576)*X5.X12.X13 + (-0.18713)*X6.X12.X13 + (0.23173)*X3.X5.X5 + (-0.76878)*X3.X6.X6 \\
 &+ (2.3901)*X3.X12.X12 + (-0.65208)*X3.X13.X13 + (0.44445)*X5.X3.X3 + (0.43459)*X5.X6.X6 \\
 &+ (0.86989)*X5.X12.X12 + (0.21047)*X5.X13.X13 + (-0.16955)*X6.X3.X3 + (0.2415)*X6.X5.X5 \\
 &+ (-0.22602)*X6.X12.X12 + (-0.49284)*X6.X13.X13 + (0.0020386)*X12.X3.X3 \\
 &+ (-0.39671)*X12.X5.X5 + (-0.90845)*X12.X6.X6 + (-4.0231e-005)*X12.X13.X13 \\
 &+ (-0.25796)*X13.X3.X3 + (-0.14199)*X13.X5.X5 + (-0.41856)*X13.X6.X6 \\
 &+ (0.042484)*X13.X12.X12 + (-0.058595)*X3.X5.X6.X6 + (1.0903)*X3.X5.X12.X12 \\
 &+ (-0.024562)*X3.X6.X12.X12 + (-0.1023)*X5.X6.X12.X12
 \end{aligned}$$

Annexe A12 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation du confort thermique

Nancy

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned} \sum DH_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 11861.9683 + (-765.3233)*X_1 + (540.9946)*X_2 + (-4927.4421)*X_3 \\ & + (3879.2477)*X_4 + (1519.8678)*X_5 + (-8918.2429)*X_6 + (103.7022)*X_7 + (325.9521)*X_8 \\ & + (1048.5523)*X_9 + (-5428.5859)*X_{10} + (-6333.9473)*X_{11} + (-369.3102)*X_3.X_5 \\ & + (-538.1027)*X_3.X_4 + (5831.1006)*X_3.X_{10} + (3294.8038)*X_{10}.X_6 + (-580.1149)*X_{10}.X_9 \\ & + (4630.957)*X_{10}.X_{11} + (233.4611)*X_{10}.X_5 + (-1115.5754)*X_{10}.X_4 + (-13.2945)*X_{11}.X_5 \\ & + (-820.9691)*X_{11}.X_4 + (-379.7453)*X_{11}.X_7 + (-1860.9802)*X_7.X_5 + (-656.2879)*X_7.X_4 \\ & + (504.5199)*X_4.X_5 \end{aligned} \quad (A12.1)$$

$$\begin{aligned} nb-h_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 408.6027 + (-16.1467)*X_1 + (-22.2856)*X_2 + (-84.4424)*X_3 + (89.6172)*X_4 \\ & + (29.4465)*X_5 + (-172.083)*X_6 + (9.0043)*X_7 + (-25.0975)*X_8 + (29.9742)*X_9 + (-93.8244)*X_{10} \\ & + (-94.4604)*X_{11} + (-10.219)*X_3.X_5 + (-1.9777)*X_3.X_4 + (44.9117)*X_3.X_{10} + (-29.0518)*X_{10}.X_6 \\ & + (-13.0686)*X_{10}.X_9 + (24.7873)*X_{10}.X_{11} + (3.5298)*X_{10}.X_5 + (-25.9511)*X_{10}.X_4 \\ & + (1.9308)*X_{11}.X_5 + (-2.0859)*X_{11}.X_4 + (11.057)*X_{11}.X_7 + (18.9337)*X_7.X_5 + (10.9714)*X_7.X_4 \\ & + (9.8753)*X_4.X_5 \end{aligned}$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned} \sum DH_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 12856.4211 + (-2499.4365)*X_1 + (-2416.7355)*X_2 + (-5994.7988)*X_3 \\ & + (5249.1651)*X_4 + (1344.884)*X_5 + (-7092.082)*X_6 + (178.0696)*X_7 + (-629.5838)*X_8 \\ & + (1254.1363)*X_9 + (-5799.0176)*X_{10} + (-6336.9655)*X_{11} + (4186.4776)*X_3.X_{10} \\ & + (1867.9735)*X_3.X_6 + (-600.7552)*X_3.X_9 + (2609.3027)*X_3.X_{11} + (-2281.5899)*X_3.X_4 \\ & + (2171.3195)*X_3.X_2 + (2260.2497)*X_2.X_{10} + (263.5902)*X_2.X_6 + (-816.3761)*X_2.X_9 \\ & + (760.8885)*X_2.X_{11} + (-145.974)*X_2.X_5 + (-749.1277)*X_2.X_4 + (-35.1896)*X_4.X_7 \\ & + (-2640.7809)*X_4.X_{10} + (-2789.9188)*X_4.X_6 + (350.4701)*X_4.X_9 + (-1721.4032)*X_4.X_{11} \\ & + (1354.5501)*X_4.X_5 + (92.667)*X_5.X_7 + (545.3785)*X_5.X_{10} + (-1278.467)*X_5.X_6 \\ & + (-232.3849)*X_5.X_9 + (-1739.4387)*X_5.X_{11} + (-252.7217)*X_{11}.X_7 + (2835.6073)*X_{11}.X_{10} \\ & + (2429.2271)*X_{11}.X_6 + (-231.7251)*X_{11}.X_9 + (-1031.6649)*X_9.X_{10} + (-2275.9686)*X_9.X_6 \\ & + (87.6855)*X_9.X_8 + (-883.1507)*X_6.X_7 + (656.9786)*X_6.X_{10} + (172.8141)*X_6.X_8 \\ & + (-272.964)*X_{10}.X_7 + (-40.1776)*X_3.X_5 \end{aligned} \quad (A12.2)$$

$$\begin{aligned} nb-h_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 414.8248 + (-25.2082)*X_1 + (-26.1304)*X_2 + (-109.8375)*X_3 + (84.7383)*X_4 \\ & + (12.4414)*X_5 + (-161.497)*X_6 + (-6.6865)*X_7 + (-23.7093)*X_8 + (19.7157)*X_9 \\ & + (-111.1561)*X_{10} + (-118.5919)*X_{11} + (57.8992)*X_3.X_{10} + (-8.2895)*X_3.X_6 + (13.8728)*X_3.X_9 \\ & + (-15.3777)*X_3.X_{11} + (-7.06)*X_3.X_4 + (20.455)*X_3.X_2 + (24.5896)*X_2.X_{10} + (-4.8601)*X_2.X_6 \\ & + (9.455)*X_2.X_9 + (-7.4643)*X_2.X_{11} + (21.6113)*X_2.X_5 + (0.83695)*X_2.X_4 + (-8.4061)*X_4.X_7 \\ & + (-26.7554)*X_4.X_{10} + (-1.3746)*X_4.X_6 + (-30.1729)*X_4.X_9 + (-4.7195)*X_4.X_{11} \\ & + (-1.6382)*X_4.X_5 + (-17.0479)*X_5.X_7 + (23.7655)*X_5.X_{10} + (-6.7565)*X_5.X_6 + (1.6865)*X_5.X_9 \\ & + (-14.3861)*X_5.X_{11} + (-2.1859)*X_{11}.X_7 + (28.8798)*X_{11}.X_{10} + (-10.4443)*X_{11}.X_6 \\ & + (-9.51)*X_{11}.X_9 + (3.9524)*X_9.X_{10} + (-10.9035)*X_9.X_6 + (-4.3219)*X_9.X_8 + (-5.5418)*X_6.X_7 \\ & + (-53.3702)*X_6.X_{10} + (-7.1266)*X_6.X_8 + (-2.5823)*X_{10}.X_7 + (9.3462)*X_3.X_5 \end{aligned}$$

• Plan de Box-Behnken

$$\begin{aligned} \sum DH_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 2993.2435 + (-479.3638)*X_1 + (-578.2354)*X_2 + (-3105.0456)*X_3 \\ & + (3284.6702)*X_4 + (1257.8638)*X_5 + (-6467.4514)*X_6 + (-109.0167)*X_7 + (-279.4006)*X_8 \\ & + (887.859)*X_9 + (-4161.2599)*X_{10} + (-4092.068)*X_{11} + (63.6337)*X_1.X_2 + (620.2235)*X_1.X_3 \\ & + (-211.6031)*X_1.X_4 + (-14.2287)*X_1.X_5 + (-756.2918)*X_1.X_6 + (63.3562)*X_1.X_7 \\ & + (-23.1422)*X_1.X_8 + (42.8383)*X_1.X_9 + (529.2479)*X_1.X_{10} + (270.8564)*X_1.X_{11} \\ & + (177.6576)*X_2.X_3 + (-116.5927)*X_2.X_4 + (73.9393)*X_2.X_5 + (347.6461)*X_2.X_6 \\ & + (25.5133)*X_2.X_7 + (92.4426)*X_2.X_8 + (217.6621)*X_2.X_9 + (626.7242)*X_2.X_{10} \\ & + (420.3925)*X_2.X_{11} + (-1668.6011)*X_3.X_4 + (-658.4956)*X_3.X_5 + (1642.0077)*X_3.X_6 \\ & + (-20.75)*X_3.X_7 + (123.9699)*X_3.X_8 + (-256.3087)*X_3.X_9 + (3616.8501)*X_3.X_{10} \\ & + (1898.9349)*X_3.X_{11} + (574.1573)*X_4.X_5 + (-2453.0211)*X_4.X_6 + (109.1751)*X_4.X_7 \\ & + (78.2434)*X_4.X_8 + (207.4203)*X_4.X_9 + (-2411.1547)*X_4.X_{10} + (-1440.842)*X_4.X_{11} \end{aligned} \quad (A12.3)$$

$$\begin{aligned}
& + (-1154.7339)*X5.X6 + (913.1889)*X5.X7 + (318.0622)*X5.X8 + (-168.5282)*X5.X9 \\
& + (-5.9954)*X5.X10 + (-673.5239)*X5.X11 + (120.7964)*X6.X7 + (70.7995)*X6.X8 \\
& + (-648.6241)*X6.X9 + (677.3121)*X6.X10 + (2194.8652)*X6.X11 + (30.7737)*X7.X8 \\
& + (-65.2515)*X7.X9 + (-268.3711)*X7.X10 + (147.0116)*X7.X11 + (77.6829)*X8.X9 \\
& + (299.4547)*X8.X10 + (-30.245)*X8.X11 + (-561.6493)*X9.X10 + (-467.7467)*X9.X11 \\
& + (2435.7095)*X10.X11 + (101.4146)*X1^2 + (-397.2804)*X2^2 + (1323.2646)*X3^2 + (588.8949)*X4^2 \\
& + (102.1534)*X5^2 + (3240.4155)*X6^2 + (281.8171)*X7^2 + (-584.0499)*X8^2 + (-261.0473)*X9^2 \\
& + (3189.8536)*X10^2 + (802.1332)*X11^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{nb-h}_{(26^\circ\text{C})} (\text{°C.h}) = & 249.8333 + (-14.0747)*X1 + (-14.1164)*X2 + (-97.3505)*X3 + (95.0858)*X4 \\
& + (32.6105)*X5 + (-196.5182)*X6 + (-9.0088)*X7 + (-10.009)*X8 + (28.2936)*X9 \\
& + (-106.2604)*X10 + (-131.0789)*X11 + (0.15336)*X1.X2 + (19.4444)*X1.X3 + (-4.917)*X1.X4 \\
& + (0.70139)*X1.X5 + (-3.5139)*X1.X6 + (0.13021)*X1.X7 + (2.5501)*X1.X8 + (-1.7734)*X1.X9 \\
& + (20.704)*X1.X10 + (19.1817)*X1.X11 + (9.443)*X2.X3 + (-5.5848)*X2.X4 + (-0.40567)*X2.X5 \\
& + (-2.2969)*X2.X6 + (2.8168)*X2.X7 + (0.77286)*X2.X8 + (-9.2786)*X2.X9 + (13.0258)*X2.X10 \\
& + (5.3449)*X2.X11 + (-20.5286)*X3.X4 + (-17.2355)*X3.X5 + (1.9175)*X3.X6 + (2.7445)*X3.X7 \\
& + (4.2127)*X3.X8 + (-8.9572)*X3.X9 + (64.213)*X3.X10 + (28.8383)*X3.X11 + (3.7665)*X4.X5 \\
& + (-7.9821)*X4.X6 + (-3.2645)*X4.X7 + (-9.4954)*X4.X8 + (4.2193)*X4.X9 + (-29.1363)*X4.X10 \\
& + (-25.5437)*X4.X11 + (1.3764)*X5.X6 + (-0.019676)*X5.X7 + (-10.5269)*X5.X8 \\
& + (-3.1435)*X5.X9 + (17.1748)*X5.X10 + (-11.4661)*X5.X11 + (0.10503)*X6.X7 + (-2.0619)*X6.X8 \\
& + (-1.5356)*X6.X9 + (-44.6861)*X6.X10 + (-19.1247)*X6.X11 + (2.0966)*X7.X8 \\
& + (-0.61892)*X7.X9 + (0.15133)*X7.X10 + (9.469)*X7.X11 + (0.052083)*X8.X9 + (8.4699)*X8.X10 \\
& + (5.5214)*X8.X11 + (-9.4511)*X9.X10 + (-4.6826)*X9.X11 + (31.4525)*X10.X11 + (-0.63669)*X1^2 \\
& + (0.060648)*X2^2 + (25.7389)*X3^2 + (7.491)*X4^2 + (2.035)*X5^2 + (47.4698)*X6^2 + (7.3199)*X7^2 \\
& + (-0.77191)*X8^2 + (1.878)*X9^2 + (79.2636)*X10^2 + (11.1864)*X11^2
\end{aligned}$$

• **Plan de couplage : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

$$\begin{aligned}
\sum \text{DH}_{(26^\circ\text{C})} (\text{°C.h}) = & 2320.4739 + (-250.6671)*X1 + (237.8084)*X2 + (-1005.511)*X3 \\
& + (2215.1746)*X4 + (1201.5708)*X5 + (-6147.9317)*X6 + (54.4496)*X7 + (-377.7915)*X8 \\
& + (1064.0873)*X9 + (-3312.6649)*X10 + (-2612.8047)*X11 + (296.4865)*X1.X2 \\
& + (810.0663)*X1.X3 + (-532.1434)*X1.X4 + (-100.369)*X1.X5 + (138.5212)*X1.X6 \\
& + (-35.3158)*X1.X7 + (-109.1211)*X1.X8 + (-103.4961)*X1.X9 + (937.5836)*X1.X10 \\
& + (497.4898)*X1.X11 + (910.8402)*X2.X3 + (-560.9544)*X2.X4 + (-57.627)*X2.X5 \\
& + (44.4519)*X2.X6 + (-294.0901)*X2.X7 + (289.45)*X2.X8 + (-488.7237)*X2.X9 \\
& + (1296.2601)*X2.X10 + (636.8121)*X2.X11 + (-2040.0767)*X3.X4 + (-740.8564)*X3.X5 \\
& + (1723.7119)*X3.X6 + (-154.8426)*X3.X7 + (341.1145)*X3.X8 + (-379.1255)*X3.X9 \\
& + (3666.2139)*X3.X10 + (2338.6285)*X3.X11 + (752.0883)*X4.X5 + (-2516.6037)*X4.X6 \\
& + (235.1474)*X4.X7 + (16.6714)*X4.X8 + (470.0899)*X4.X9 + (-2407.6427)*X4.X10 \\
& + (-1897.599)*X4.X11 + (-1148.1018)*X5.X6 + (-18.8705)*X5.X7 + (150.1733)*X5.X8 \\
& + (536.6603)*X5.X9 + (55.9323)*X5.X10 + (-1056.7991)*X5.X11 + (352.4928)*X6.X7 \\
& + (155.5327)*X6.X8 + (-98.9533)*X6.X9 + (671.1073)*X6.X10 + (2365.6421)*X6.X11 \\
& + (-63.2813)*X7.X8 + (255.1976)*X7.X9 + (-225.1193)*X7.X10 + (-194.3586)*X7.X11 \\
& + (-129.4921)*X8.X9 + (521.715)*X8.X10 + (46.9831)*X8.X11 + (-773.7323)*X9.X10 \\
& + (-590.6107)*X9.X11 + (2849.85)*X10.X11 + (1527.6461)*X3.X3 + (706.2804)*X4.X4 \\
& + (242.7792)*X5.X5 + (3279.6321)*X6.X6 + (3470.871)*X10.X10 + (980.5862)*X11.X11 \\
& + (-495.2471)*X1.X2.X3 + (320.2379)*X1.X2.X4 + (-228.3439)*X1.X2.X5 + (86.918)*X1.X2.X6 \\
& + (224.1703)*X1.X2.X10 + (-213.0441)*X1.X2.X11 + (406.325)*X1.X3.X4 + (-160.6049)*X1.X3.X5 \\
& + (140.5464)*X1.X3.X6 + (-735.4647)*X1.X3.X10 + (-148.7431)*X1.X3.X11 \\
& + (-54.9144)*X1.X4.X5 + (-35.0989)*X1.X4.X6 + (507.8733)*X1.X4.X10 + (71.0622)*X1.X4.X11 \\
& + (-96.7232)*X1.X5.X6 + (-403.0741)*X1.X5.X10 + (446.2901)*X1.X5.X11 \\
& + (297.0891)*X1.X6.X10 + (-20.995)*X1.X6.X11 + (-392.365)*X1.X10.X11 \\
& + (-102.4612)*X2.X3.X4 + (287.1134)*X2.X3.X5 + (-228.9759)*X2.X3.X6 \\
& + (-1686.907)*X2.X3.X10 + (-501.6613)*X2.X3.X11 + (225.8129)*X2.X4.X5 \\
& + (-39.8335)*X2.X4.X6 + (538.7126)*X2.X4.X10 + (148.4623)*X2.X4.X11 + (-410.5681)*X2.X5.X6 \\
& + (-77.3254)*X2.X5.X10 + (200.2717)*X2.X5.X11 + (188.7408)*X2.X6.X10 \\
& + (819.4216)*X2.X6.X11 + (-635.306)*X2.X10.X11 + (-178.6308)*X3.X4.X5 \\
& + (340.7629)*X3.X4.X6 + (1747.7523)*X3.X4.X10 + (573.73)*X3.X4.X11 + (-23.821)*X3.X5.X6 \\
& + (-21.6347)*X3.X5.X10 + (347.259)*X3.X5.X11 + (101.7167)*X3.X6.X10 + (-13.7045)*X3.X6.X11 \\
& + (-1805.3574)*X3.X10.X11 + (-147.8589)*X4.X5.X6 + (171.5068)*X4.X5.X10 \\
& + (-229.3584)*X4.X5.X11 + (-100.7745)*X4.X6.X10 + (611.8143)*X4.X6.X11 \\
& + (852.5352)*X4.X10.X11 + (-335.6546)*X5.X6.X10 + (205.9458)*X5.X6.X11 \\
& + (374.8941)*X5.X10.X11 + (443.1869)*X6.X10.X11 + (557.5156)*X1.X2.X2 \\
& + (-460.893)*X1.X3.X3 + (-7.3162)*X1.X4.X4 + (98.0675)*X1.X5.X5 + (-19.4127)*X1.X6.X6 \\
& + (-205.627)*X1.X10.X10 + (-390.2148)*X1.X11.X11 + (-87.4105)*X2.X1.X1 \\
& + (-170.6932)*X2.X3.X3 + (-108.3683)*X2.X4.X4 + (-269.9461)*X2.X5.X5 + (-466.8933)*X2.X6.X6 \\
& + (-559.3933)*X2.X10.X10 + (-321.3628)*X2.X11.X11 + (50.6115)*X3.X1.X1 \\
& + (77.0759)*X3.X2.X2 + (-435.2865)*X3.X4.X4 + (-541.0906)*X3.X5.X5 + (-979.7724)*X3.X6.X6 \\
& + (-2826.2219)*X3.X10.X10 + (-620.7912)*X3.X11.X11 + (699.9169)*X4.X1.X1 \\
& + (-300.0665)*X4.X2.X2 + (1102.4398)*X4.X3.X3 + (680.0419)*X4.X5.X5 + (140.9936)*X4.X6.X6
\end{aligned}$$

(A12.4)

$$\begin{aligned}
& + (498.272)*X4.X10.X10 + (-159.6011)*X4.X11.X11 + (-191.6204)*X5.X1.X1 \\
& + (-387.4159)*X5.X2.X2 + (728.6691)*X5.X3.X3 + (-419.701)*X5.X4.X4 + (381.3707)*X5.X6.X6 \\
& + (-328.3415)*X5.X10.X10 + (411.294)*X5.X11.X11 + (75.5128)*X6.X1.X1 \\
& + (-346.0899)*X6.X2.X2 + (-21.9154)*X6.X3.X3 + (-177.2572)*X6.X4.X4 + (26.9555)*X6.X5.X5 \\
& + (-376.1081)*X6.X10.X10 + (35.5392)*X6.X11.X11 + (-393.624)*X10.X1.X1 \\
& + (-232.9299)*X10.X2.X2 + (-2204.7877)*X10.X3.X3 + (175.3849)*X10.X4.X4 \\
& + (-282.0428)*X10.X5.X5 + (710.1597)*X10.X6.X6 + (227.2927)*X10.X11.X11 \\
& + (268.2512)*X11.X1.X1 + (57.1316)*X11.X2.X2 + (-791.6442)*X11.X3.X3 \\
& + (-953.2629)*X11.X4.X4 + (470.7949)*X11.X5.X5 + (-524.3458)*X11.X6.X6 \\
& + (-2223.1779)*X11.X10.X10
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{nb-h}_{(26^\circ\text{C})} (\text{°C.h}) = & 258.3682 + (-15.0859)*X1 + (-17.2334)*X2 + (-90.7269)*X3 + (100.8874)*X4 \\
& + (44.5285)*X5 + (-221.5086)*X6 + (-6.4969)*X7 + (-13.671)*X8 + (26.2864)*X9 \\
& + (-102.7864)*X10 + (-139.6345)*X11 + (-1.119)*X1.X2 + (8.0313)*X1.X3 + (-3.8014)*X1.X4 \\
& + (6.5484)*X1.X5 + (-4.4324)*X1.X6 + (1.7774)*X1.X7 + (2.8529)*X1.X8 + (-0.039136)*X1.X9 \\
& + (10.0459)*X1.X10 + (-0.11754)*X1.X11 + (7.2363)*X2.X3 + (-6.0546)*X2.X4 + (1.82)*X2.X5 \\
& + (-1.4049)*X2.X6 + (1.2617)*X2.X7 + (0.57312)*X2.X8 + (4.4813)*X2.X9 + (17.3777)*X2.X10 \\
& + (-1.0446)*X2.X11 + (-13.6166)*X3.X4 + (-6.0651)*X3.X5 + (-2.3207)*X3.X6 + (-1.0191)*X3.X7 \\
& + (10.1381)*X3.X8 + (-11.4804)*X3.X9 + (59.9688)*X3.X10 + (18.0204)*X3.X11 \\
& + (-0.31263)*X4.X5 + (-3.9775)*X4.X6 + (-5.8183)*X4.X7 + (-4.0395)*X4.X8 + (2.707)*X4.X9 \\
& + (-26.505)*X4.X10 + (-16.5039)*X4.X11 + (-2.9211)*X5.X6 + (-5.4046)*X5.X7 \\
& + (-0.14502)*X5.X8 + (-2.255)*X5.X9 + (12.8305)*X5.X10 + (-9.3076)*X5.X11 + (1.8156)*X6.X7 \\
& + (-2.5039)*X6.X8 + (0.11385)*X6.X9 + (-49.7043)*X6.X10 + (-11.7642)*X6.X11 + (2.0436)*X7.X8 \\
& + (2.3237)*X7.X9 + (-0.071067)*X7.X10 + (7.2031)*X7.X11 + (-1.09)*X8.X9 + (11.2929)*X8.X10 \\
& + (1.2193)*X8.X11 + (-11.951)*X9.X10 + (5.7712)*X9.X11 + (30.3949)*X10.X11 \\
& + (25.8446)*X3.X3 + (2.517)*X4.X4 + (-0.28006)*X5.X5 + (44.5272)*X6.X6 + (77.4547)*X10.X10 \\
& + (6.7259)*X11.X11 + (5.5747)*X2.X3.X4 + (-5.485)*X2.X3.X5 + (4.4164)*X2.X3.X6 \\
& + (-6.2519)*X2.X3.X10 + (4.4677)*X2.X3.X11 + (6.7951)*X2.X4.X5 + (-5.071)*X2.X4.X6 \\
& + (4.4361)*X2.X4.X10 + (-3.5799)*X2.X4.X11 + (11.7901)*X2.X5.X6 + (-12.0641)*X2.X5.X10 \\
& + (4.6049)*X2.X5.X11 + (4.9347)*X2.X6.X10 + (4.1338)*X2.X6.X11 + (-1.0917)*X2.X10.X11 \\
& + (1.7071)*X3.X4.X5 + (-14.062)*X3.X4.X6 + (7.8295)*X3.X4.X10 + (-2.3921)*X3.X4.X11 \\
& + (4.864)*X3.X5.X6 + (-5.3625)*X3.X5.X10 + (0.91482)*X3.X5.X11 + (31.8471)*X3.X6.X10 \\
& + (11.8468)*X3.X6.X11 + (-8.3041)*X3.X10.X11 + (6.2328)*X4.X5.X6 + (2.9384)*X4.X5.X10 \\
& + (-2.5744)*X4.X5.X11 + (-25.444)*X4.X6.X10 + (-16.2282)*X4.X6.X11 + (-6.5195)*X4.X10.X11 \\
& + (3.7504)*X5.X6.X10 + (-6.6118)*X5.X6.X11 + (-10.8547)*X5.X10.X11 + (21.8174)*X6.X10.X11 \\
& + (10.6841)*X3.X4.X4 + (-2.3855)*X3.X5.X5 + (16.4099)*X3.X6.X6 + (-52.9464)*X3.X10.X10 \\
& + (9.5551)*X3.X11.X11 + (-1.5867)*X4.X3.X3 + (-4.8221)*X4.X5.X5 + (-29.1626)*X4.X6.X6 \\
& + (22.8684)*X4.X10.X10 + (-2.7056)*X4.X11.X11 + (7.0206)*X5.X3.X3 + (-4.2944)*X5.X4.X4 \\
& + (-11.2869)*X5.X6.X6 + (-20.6532)*X5.X10.X10 + (0.23837)*X5.X11.X11 + (8.2893)*X6.X3.X3 \\
& + (10.2549)*X6.X4.X4 + (-0.41416)*X6.X5.X5 + (28.2821)*X6.X10.X10 + (15.9134)*X6.X11.X11 \\
& + (-15.2004)*X10.X3.X3 + (-4.4753)*X10.X4.X4 + (0.53488)*X10.X5.X5 + (7.2128)*X10.X6.X6 \\
& + (3.3148)*X10.X11.X11 + (4.9583)*X11.X3.X3 + (5.9008)*X11.X4.X4 + (5.692)*X11.X5.X5 \\
& + (24.6136)*X11.X6.X6 + (-19.3045)*X11.X10.X10 + (2.5259)*X3.X4.X5.X6 \\
& + (-2.3756)*X3.X4.X5.X10 + (-2.8438)*X3.X4.X5.X11 + (5.8331)*X3.X4.X6.X10 \\
& + (-7.2161)*X3.X4.X6.X11 + (18.9001)*X3.X4.X10.X11 + (-3.7549)*X3.X5.X6.X10 \\
& + (-1.3406)*X3.X5.X6.X11 + (6.2144)*X3.X5.X10.X11 + (-5.5636)*X3.X6.X10.X11 \\
& + (3.9832)*X4.X5.X6.X10 + (-0.082615)*X4.X5.X6.X11 + (-0.80793)*X4.X5.X10.X11 \\
& + (-2.0825)*X4.X6.X10.X11 + (-4.7966)*X5.X6.X10.X11 + (-6.6099)*X3.X4.X5.X6.X10 \\
& + (-4.6592)*X3.X4.X5.X6.X11 + (-3.5754)*X3.X4.X5.X10.X11 + (4.19)*X3.X4.X6.X10.X11 \\
& + (9.3294)*X3.X5.X6.X10.X11 + (-0.79283)*X4.X5.X6.X10.X11
\end{aligned}$$

Agén

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned}
\sum \text{DH}_{(26^\circ\text{C})} (\text{°C.h}) = & 23709.2485 + (-1287.7639)*X1 + (137.2661)*X2 + (-8445.8408)*X3 \\
& + (7357.7925)*X4 + (2097.8466)*X5 + (-13537.9223)*X6 + (536.1602)*X7 + (684.9503)*X8 \\
& + (1949.0269)*X9 + (-11786.7041)*X10 + (-12280.9584)*X11 + (-253.07)*X3.X5 \\
& + (-538.1108)*X3.X4 + (9885.4005)*X3.X10 + (4494.5042)*X10.X6 + (-1170.9746)*X10.X9 \\
& + (8011.8431)*X10.X11 + (736.334)*X10.X5 + (-2548.4855)*X10.X4 + (-235.6316)*X11.X5 \\
& + (-2126.6585)*X11.X4 + (-496.3046)*X11.X7 + (-1811.1375)*X7.X5 + (-613.2401)*X7.X4 \\
& + (755.6456)*X4.X5
\end{aligned} \tag{A12.5}$$

$$\begin{aligned}
\text{nb-h}_{(26^\circ\text{C})} (\text{°C.h}) = & 675.6635 + (-4.4528)*X1 + (-40.5182)*X2 + (-121.3319)*X3 + (111.2486)*X4 \\
& + (26.7804)*X5 + (-159.4094)*X6 + (1.3018)*X7 + (-32.1461)*X8 + (34.9633)*X9 \\
& + (-179.3938)*X10 + (-149.0049)*X11 + (-8.0229)*X3.X5 + (-6.8186)*X3.X4 + (31.4708)*X3.X10
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (-78.6866)*X_{10}.X_6 + (-4.6195)*X_{10}.X_9 + (-2.1178)*X_{10}.X_{11} + (20.406)*X_{10}.X_5 \\
& + (-15.4291)*X_{10}.X_4 + (-11.5466)*X_{11}.X_5 + (-11.4222)*X_{11}.X_4 + (11.8961)*X_{11}.X_7 \\
& + (27.0622)*X_7.X_5 + (10.6994)*X_7.X_4 + (5.5055)*X_4.X_5
\end{aligned}$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned}
\sum DH_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 25047.5913 + (-3929.9035)*X_1 + (-3918.6659)*X_2 + (-10594.8946)*X_3 \\
& + (8941.9942)*X_4 + (1855.5376)*X_5 + (-10297.8246)*X_6 + (417.0761)*X_7 + (-908.4603)*X_8 \\
& + (2239.5402)*X_9 + (-12481.2017)*X_{10} + (-12626.0702)*X_{11} + (7753.6001)*X_3.X_{10} \\
& + (1857.1706)*X_3.X_6 + (-465.6005)*X_3.X_9 + (4492.6586)*X_3.X_{11} + (-3090.0611)*X_3.X_4 \\
& + (3411.4351)*X_3.X_2 + (3664.5247)*X_2.X_{10} + (278.2906)*X_2.X_6 + (-1141.2167)*X_2.X_9 \\
& + (1274.5099)*X_2.X_{11} + (193.5861)*X_2.X_5 + (-1044.0074)*X_2.X_4 + (-130.2337)*X_4.X_7 \\
& + (-4516.0756)*X_4.X_{10} + (-3479.6694)*X_4.X_6 + (-38.1645)*X_4.X_9 + (-3089.5606)*X_4.X_{11} \\
& + (1999.83)*X_4.X_5 + (-115.441)*X_5.X_7 + (1156.6468)*X_5.X_{10} + (-1913.1426)*X_5.X_6 \\
& + (-192.7158)*X_5.X_9 + (-2611.9788)*X_5.X_{11} + (-616.5123)*X_{11}.X_7 + (6106.3632)*X_{11}.X_{10} \\
& + (3240.5074)*X_{11}.X_6 + (-641.1119)*X_{11}.X_9 + (-1455.5205)*X_9.X_{10} + (-3104.1278)*X_9.X_6 \\
& + (180.9901)*X_9.X_8 + (-1271.9574)*X_6.X_7 + (-206.4747)*X_6.X_{10} + (-196.3553)*X_6.X_8 \\
& + (-562.4086)*X_{10}.X_7 + (38.4975)*X_3.X_5
\end{aligned} \tag{A12.6}$$

$$\begin{aligned}
nb-h_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 657.8882 + (-20.0754)*X_1 + (-26.0757)*X_2 + (-130.8187)*X_3 + (105.1202)*X_4 \\
& + (21.9975)*X_5 + (-176.8641)*X_6 + (-3.3057)*X_7 + (-14.214)*X_8 + (36.3806)*X_9 \\
& + (-181.5013)*X_{10} + (-172.1321)*X_{11} + (64.4295)*X_3.X_{10} + (-15.1359)*X_3.X_6 + (8.2229)*X_3.X_9 \\
& + (-4.7215)*X_3.X_{11} + (-1.8396)*X_3.X_4 + (19.3968)*X_3.X_2 + (19.9151)*X_2.X_{10} + (-3.769)*X_2.X_6 \\
& + (14.418)*X_2.X_9 + (-5.6549)*X_2.X_{11} + (17.0198)*X_2.X_5 + (3.9492)*X_2.X_4 + (-2.3636)*X_4.X_7 \\
& + (-21.712)*X_4.X_{10} + (12.1607)*X_4.X_6 + (-26.6662)*X_4.X_9 + (-4.5997)*X_4.X_{11} + (-3.2826)*X_4.X_5 \\
& + (-3.0661)*X_5.X_7 + (27.556)*X_5.X_{10} + (3.8019)*X_5.X_6 + (-0.59332)*X_5.X_9 + (-17.5713)*X_5.X_{11} \\
& + (4.6787)*X_{11}.X_7 + (12.821)*X_{11}.X_{10} + (-26.6963)*X_{11}.X_6 + (-1.2791)*X_{11}.X_9 \\
& + (-4.3213)*X_9.X_{10} + (4.0502)*X_9.X_6 + (-3.6769)*X_9.X_8 + (-3.2218)*X_6.X_7 + (-84.9984)*X_6.X_{10} \\
& + (-0.56178)*X_6.X_8 + (-3.9874)*X_{10}.X_7 + (-3.534)*X_3.X_5
\end{aligned}$$

• Plan de Box-Behnken

$$\begin{aligned}
\sum DH_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 8123.2332 + (-925.599)*X_1 + (-1251.6934)*X_2 + (-6240.4141)*X_3 \\
& + (6391.5645)*X_4 + (1998.0754)*X_5 + (-10364.8122)*X_6 + (81.8353)*X_7 + (-390.0141)*X_8 \\
& + (1829.9978)*X_9 + (-10114.242)*X_{10} + (-9050.2111)*X_{11} + (45.3777)*X_1.X_2 \\
& + (1375.8221)*X_1.X_3 + (-392.4141)*X_1.X_4 + (15.7412)*X_1.X_5 + (-1451.5021)*X_1.X_6 \\
& + (118.6002)*X_1.X_7 + (0.57159)*X_1.X_8 + (20.9434)*X_1.X_9 + (1242.3618)*X_1.X_{10} \\
& + (838.8485)*X_1.X_{11} + (449.3304)*X_2.X_3 + (-313.6072)*X_2.X_4 + (171.2702)*X_2.X_5 \\
& + (315.9699)*X_2.X_6 + (87.4412)*X_2.X_7 + (91.7432)*X_2.X_8 + (-21.8322)*X_2.X_9 \\
& + (1451.3619)*X_2.X_{10} + (859.4661)*X_2.X_{11} + (-2545.3277)*X_3.X_4 + (-988.0352)*X_3.X_5 \\
& + (1696.1259)*X_3.X_6 + (-59.5964)*X_3.X_7 + (146.6967)*X_3.X_8 + (-545.2246)*X_3.X_9 \\
& + (7227.9985)*X_3.X_{10} + (3575.6048)*X_3.X_{11} + (871.3577)*X_4.X_5 + (-3238.4877)*X_4.X_6 \\
& + (161.6153)*X_4.X_7 + (146.7978)*X_4.X_8 + (375.1464)*X_4.X_9 + (-4392.0694)*X_4.X_{10} \\
& + (-2948.1949)*X_4.X_{11} + (-1618.1603)*X_5.X_6 + (1223.455)*X_5.X_7 + (277.1005)*X_5.X_8 \\
& + (-403.8182)*X_5.X_9 + (596.2784)*X_5.X_{10} + (-1237.2336)*X_5.X_{11} + (149.5721)*X_6.X_7 \\
& + (-92.9881)*X_6.X_8 + (-861.9082)*X_6.X_9 + (-127.0207)*X_6.X_{10} + (2996.2703)*X_6.X_{11} \\
& + (139.3373)*X_7.X_8 + (-71.5721)*X_7.X_9 + (-530.8983)*X_7.X_{10} + (-63.7685)*X_7.X_{11} \\
& + (218.8132)*X_8.X_9 + (499.011)*X_8.X_{10} + (-15.9062)*X_8.X_{11} + (-1128.2134)*X_9.X_{10} \\
& + (-834.354)*X_9.X_{11} + (5628.5841)*X_{10}.X_{11} + (95.7723)*X_{11}^2 + (-566.1491)*X_2^2 \\
& + (2292.7579)*X_3^2 + (889.8194)*X_4^2 + (85.5641)*X_5^2 + (4078.0718)*X_6^2 + (569.564)*X_7^2 \\
& + (-744.7792)*X_8^2 + (-448.4291)*X_9^2 + (7093.7236)*X_{10}^2 + (1652.2462)*X_{11}^2
\end{aligned} \tag{A12.7}$$

$$\begin{aligned}
nb-h_{(26^\circ C)} (^{\circ}C.h) = & 527.9259 + (-12.3174)*X_1 + (-19.1539)*X_2 + (-123.6781)*X_3 + (122.5385)*X_4 \\
& + (35.6742)*X_5 + (-204.4855)*X_6 + (-5.5336)*X_7 + (-8.7755)*X_8 + (40.4547)*X_9 \\
& + (-185.2369)*X_{10} + (-203.7507)*X_{11} + (-0.069155)*X_1.X_2 + (6.9997)*X_1.X_3 + (-3.3825)*X_1.X_4 \\
& + (3.0703)*X_1.X_5 + (13.2297)*X_1.X_6 + (-1.0816)*X_1.X_7 + (3.5865)*X_1.X_8 + (-2.3142)*X_1.X_9 \\
& + (12.0527)*X_1.X_{10} + (14.9757)*X_1.X_{11} + (9.2147)*X_2.X_3 + (-4.4297)*X_2.X_4 + (-2.2196)*X_2.X_5 \\
& + (-3.3721)*X_2.X_6 + (0.9783)*X_2.X_7 + (-0.91319)*X_2.X_8 + (-7.248)*X_2.X_9 + (14.7671)*X_2.X_{10} \\
& + (1.0145)*X_2.X_{11} + (-9.684)*X_3.X_4 + (-14.9311)*X_3.X_5 + (-9.5043)*X_3.X_6 + (-0.64931)*X_3.X_7 \\
& + (3.0556)*X_3.X_8 + (-6.5405)*X_3.X_9 + (62.9991)*X_3.X_{10} + (8.5524)*X_3.X_{11} + (1.3417)*X_4.X_5 \\
& + (17.3417)*X_4.X_6 + (0.76476)*X_4.X_7 + (-7.9497)*X_4.X_8 + (-0.61198)*X_4.X_9 + (-14.3707)*X_4.X_{10} \\
& + (-21.8744)*X_4.X_{11} + (4.2286)*X_5.X_6 + (-8.4962)*X_5.X_7 + (-11.9488)*X_5.X_8 + (-2.8785)*X_5.X_9 \\
& + (29.9945)*X_5.X_{10} + (-13.7031)*X_5.X_{11} + (0.028067)*X_6.X_7 + (-0.37471)*X_6.X_8 \\
& + (6.127)*X_6.X_9 + (-95.2682)*X_6.X_{10} + (-52.3935)*X_6.X_{11} + (-0.25)*X_7.X_8 + (0.050637)*X_7.X_9 \\
& + (-7.0718)*X_7.X_{10} + (5.4783)*X_7.X_{11} + (-0.17216)*X_8.X_9 + (8.4175)*X_8.X_{10} + (3.5767)*X_8.X_{11} \\
& + (-7.7922)*X_9.X_{10} + (6.344)*X_9.X_{11} + (10.0683)*X_{10}.X_{11} + (-3.938)*X_{11}^2 + (3.4867)*X_2^2 \\
& + (24.0737)*X_3^2 + (-2.4324)*X_4^2 + (-4.9363)*X_5^2 + (23.1578)*X_6^2 + (0.72631)*X_7^2 + (6.1241)*X_8^2 \\
& + (-2.3449)*X_9^2 + (109.0479)*X_{10}^2 + (-10.6985)*X_{11}^2
\end{aligned}$$

• **Plan de couplage : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

$$\begin{aligned} \sum DH_{(26^{\circ}C)} (^{\circ}C.h) = & 7284.8033 + (-318.2508)*X1 + (-198.1097)*X2 + (-3333.2996)*X3 \\ & + (4783.6935)*X4 + (2107.319)*X5 + (-10533.9169)*X6 + (288.1491)*X7 + (-514.673)*X8 \\ & + (2045.5635)*X9 + (-8822.3308)*X10 + (-6717.1063)*X11 + (353.3272)*X1.X2 \\ & + (1076.2599)*X1.X3 + (-715.5939)*X1.X4 + (12.9736)*X1.X5 + (110.7503)*X1.X6 \\ & + (-37.4506)*X1.X7 + (-35.4284)*X1.X8 + (-162.119)*X1.X9 + (1641.3597)*X1.X10 \\ & + (793.7052)*X1.X11 + (1320.9854)*X2.X3 + (-854.3091)*X2.X4 + (127.3982)*X2.X5 \\ & + (42.9772)*X2.X6 + (-287.7745)*X2.X7 + (313.584)*X2.X8 + (-598.2975)*X2.X9 \\ & + (2338.5832)*X2.X10 + (1119.495)*X2.X11 + (-2876.6682)*X3.X4 + (-996.5997)*X3.X5 \\ & + (1795.9328)*X3.X6 + (-249.8952)*X3.X7 + (466.6505)*X3.X8 + (-624.0025)*X3.X9 \\ & + (7101.2293)*X3.X10 + (4098.0632)*X3.X11 + (1070.9358)*X4.X5 + (-3160.4658)*X4.X6 \\ & + (253.7548)*X4.X7 + (21.1235)*X4.X8 + (623.5888)*X4.X9 + (-4297.0277)*X4.X10 \\ & + (-3411.4488)*X4.X11 + (-1676.5298)*X5.X6 + (-8.2586)*X5.X7 + (231.3134)*X5.X8 \\ & + (477.3498)*X5.X9 + (553.7637)*X5.X10 + (-1684.1124)*X5.X11 + (538.0549)*X6.X7 \\ & + (-86.5179)*X6.X8 + (-162.9346)*X6.X9 + (-93.5468)*X6.X10 + (3284.4921)*X6.X11 \\ & + (54.3554)*X7.X8 + (311.0419)*X7.X9 + (-483.699)*X7.X10 + (-422.2483)*X7.X11 \\ & + (-124.13)*X8.X9 + (774.0598)*X8.X10 + (100.9637)*X8.X11 + (-1386.1047)*X9.X10 \\ & + (-865.398)*X9.X11 + (6128.2786)*X10.X11 + (2611.3429)*X3.X3 + (971.1937)*X4.X4 \\ & + (237.8726)*X5.X5 + (4091.4332)*X6.X6 + (7485.6512)*X10.X10 + (1872.2237)*X11.X11 \\ & + (-539.2093)*X1.X2.X3 + (413.2547)*X1.X2.X4 + (-343.0902)*X1.X2.X5 + (123.0715)*X1.X2.X6 \\ & + (11.172)*X1.X2.X10 + (-204.5987)*X1.X2.X11 + (550.5806)*X1.X3.X4 + (-253.5915)*X1.X3.X5 \\ & + (167.5543)*X1.X3.X6 + (-1260.8541)*X1.X3.X10 + (-214.7875)*X1.X3.X11 \\ & + (-67.6555)*X1.X4.X5 + (-86.1602)*X1.X4.X6 + (786.3433)*X1.X4.X10 + (84.5705)*X1.X4.X11 \\ & + (-76.7005)*X1.X5.X6 + (-614.9694)*X1.X5.X10 + (201.6485)*X1.X5.X11 \\ & + (429.1957)*X1.X6.X10 + (49.2755)*X1.X6.X11 + (-730.3062)*X1.X10.X11 \\ & + (-98.3906)*X2.X3.X4 + (161.5324)*X2.X3.X5 + (-248.4758)*X2.X3.X6 \\ & + (-2047.9991)*X2.X3.X10 + (-586.4955)*X2.X3.X11 + (276.5626)*X2.X4.X5 \\ & + (-92.6881)*X2.X4.X6 + (669.2236)*X2.X4.X10 + (204.4142)*X2.X4.X11 + (-279.9484)*X2.X5.X6 \\ & + (-187.9682)*X2.X5.X10 + (262.3414)*X2.X5.X11 + (271.0569)*X2.X6.X10 \\ & + (722.0512)*X2.X6.X11 + (-952.2196)*X2.X10.X11 + (-305.634)*X3.X4.X5 \\ & + (177.9022)*X3.X4.X6 + (2368.0642)*X3.X4.X10 + (607.5312)*X3.X4.X11 + (142.878)*X3.X5.X6 \\ & + (-72.1829)*X3.X5.X10 + (647.4671)*X3.X5.X11 + (632.414)*X3.X6.X10 \\ & + (215.4787)*X3.X6.X11 + (-3126.9962)*X3.X10.X11 + (-269.236)*X4.X5.X6 \\ & + (319.4999)*X4.X5.X10 + (-371.8362)*X4.X5.X11 + (-480.1142)*X4.X6.X10 \\ & + (554.5634)*X4.X6.X11 + (1591.8746)*X4.X10.X11 + (-258.512)*X5.X6.X10 \\ & + (366.6961)*X5.X6.X11 + (228.9029)*X5.X10.X11 + (1453.6669)*X6.X10.X11 \\ & + (759.4234)*X1.X2.X2 + (-582.2987)*X1.X3.X3 + (-1.3362)*X1.X4.X4 + (-86.5021)*X1.X5.X5 \\ & + (112.1386)*X1.X6.X6 + (-704.5124)*X1.X10.X10 + (-751.6382)*X1.X11.X11 \\ & + (-58.4802)*X2.X1.X1 + (-213.4206)*X2.X3.X3 + (-417.4733)*X2.X4.X4 + (-316.8549)*X2.X5.X5 \\ & + (-135.8307)*X2.X6.X6 + (-1320.7353)*X2.X10.X10 + (-36.2723)*X2.X11.X11 \\ & + (192.779)*X3.X1.X1 + (-136.8827)*X3.X2.X2 + (-164.5198)*X3.X4.X4 + (-369.7827)*X3.X5.X5 \\ & + (-711.3263)*X3.X6.X6 + (-5559.3375)*X3.X10.X10 + (-574.4395)*X3.X11.X11 \\ & + (645.2273)*X4.X1.X1 + (-305.0408)*X4.X2.X2 + (1307.7557)*X4.X3.X3 + (425.3562)*X4.X5.X5 \\ & + (38.1698)*X4.X6.X6 + (1755.049)*X4.X10.X10 + (170.991)*X4.X11.X11 \\ & + (-254.4236)*X5.X1.X1 + (-493.1102)*X5.X2.X2 + (1030.5085)*X5.X3.X3 \\ & + (-516.8837)*X5.X4.X4 + (474.0603)*X5.X6.X6 + (-1064.0472)*X5.X10.X10 \\ & + (623.2847)*X5.X11.X11 + (-77.8059)*X6.X1.X1 + (-522.3329)*X6.X2.X2 + (387.0022)*X6.X3.X3 \\ & + (-259.9678)*X6.X4.X4 + (209.4984)*X6.X5.X5 + (434.467)*X6.X10.X10 \\ & + (253.8099)*X6.X11.X11 + (-398.269)*X10.X1.X1 + (-45.0938)*X10.X2.X2 \\ & + (-3303.0724)*X10.X3.X3 + (111.1347)*X10.X4.X4 + (-519.7625)*X10.X5.X5 \\ & + (983.6634)*X10.X6.X6 + (49.2954)*X10.X11.X11 + (315.2313)*X11.X1.X1 \\ & + (156.0385)*X11.X2.X2 + (-1272.55)*X11.X3.X3 + (-1342.7918)*X11.X4.X4 \\ & + (647.8803)*X11.X5.X5 + (-203.0131)*X11.X6.X6 + (-4171.7788)*X11.X10.X10 \end{aligned} \quad (A12.8)$$

$$\begin{aligned} nb-h_{(26^{\circ}C)} (^{\circ}C.h) = & 533.1826 + (-15.8655)*X1 + (-20.0994)*X2 + (-119.8513)*X3 + (135.803)*X4 \\ & + (45.1479)*X5 + (-224.2005)*X6 + (-4.5609)*X7 + (-9.7941)*X8 + (36.4639)*X9 \\ & + (-188.1981)*X10 + (-227.8469)*X11 + (0.8508)*X1.X2 + (5.5372)*X1.X3 + (-4.9077)*X1.X4 \\ & + (6.9148)*X1.X5 + (-3.9316)*X1.X6 + (1.2118)*X1.X7 + (2.956)*X1.X8 + (-2.1521)*X1.X9 \\ & + (4.3658)*X1.X10 + (4.1173)*X1.X11 + (5.6185)*X2.X3 + (-4.5859)*X2.X4 + (2.144)*X2.X5 \\ & + (-1.3944)*X2.X6 + (-0.9798)*X2.X7 + (2.5187)*X2.X8 + (3.4645)*X2.X9 + (15.4815)*X2.X10 \\ & + (-0.53859)*X2.X11 + (-4.8864)*X3.X4 + (-10.6517)*X3.X5 + (-10.6068)*X3.X6 \\ & + (-1.4117)*X3.X7 + (4.4705)*X3.X8 + (-7.72)*X3.X9 + (64.2114)*X3.X10 + (0.985)*X3.X11 \\ & + (-3.8492)*X4.X5 + (12.3141)*X4.X6 + (-4.5399)*X4.X7 + (-2.7511)*X4.X8 + (-3.347)*X4.X9 \\ & + (-20.5463)*X4.X10 + (-16.428)*X4.X11 + (3.4566)*X5.X6 + (-1.7293)*X5.X7 + (-1.0328)*X5.X8 \\ & + (-2.5452)*X5.X9 + (26.5898)*X5.X10 + (-11.2385)*X5.X11 + (1.3952)*X6.X7 + (-0.65506)*X6.X8 \\ & + (2.1546)*X6.X9 + (-88.2882)*X6.X10 + (-34.9271)*X6.X11 + (0.14818)*X7.X8 + (3.6885)*X7.X9 \\ & + (-3.3849)*X7.X10 + (5.3823)*X7.X11 + (-0.89794)*X8.X9 + (6.6548)*X8.X10 + (-0.1683)*X8.X11 \\ & + (-11.5362)*X9.X10 + (8.2089)*X9.X11 + (11.4683)*X10.X11 + (25.0246)*X3.X3 \\ & + (-4.297)*X4.X4 + (-5.765)*X5.X5 + (21.0647)*X6.X6 + (104.7157)*X10.X10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (-14.0706)*X_{11}.X_{11} + (0.81044)*X_2.X_3.X_4 + (-1.2644)*X_2.X_3.X_5 + (8.5973)*X_2.X_3.X_6 \\
& + (-2.8721)*X_2.X_3.X_{10} + (4.6513)*X_2.X_3.X_{11} + (-1.4799)*X_2.X_4.X_5 + (-2.9733)*X_2.X_4.X_6 \\
& + (-0.94262)*X_2.X_4.X_{10} + (-6.1843)*X_2.X_4.X_{11} + (5.3239)*X_2.X_5.X_6 + (-2.7042)*X_2.X_5.X_{10} \\
& + (4.2566)*X_2.X_5.X_{11} + (7.5201)*X_2.X_6.X_{10} + (3.0313)*X_2.X_6.X_{11} + (2.2707)*X_2.X_{10}.X_{11} \\
& + (-1.8313)*X_3.X_4.X_5 + (-9.2572)*X_3.X_4.X_6 + (-6.5608)*X_3.X_4.X_{10} + (-6.8927)*X_3.X_4.X_{11} \\
& + (0.26352)*X_3.X_5.X_6 + (0.76705)*X_3.X_5.X_{10} + (5.9353)*X_3.X_5.X_{11} + (22.2835)*X_3.X_6.X_{10} \\
& + (2.9934)*X_3.X_6.X_{11} + (24.1222)*X_3.X_{10}.X_{11} + (4.1923)*X_4.X_5.X_6 + (2.1707)*X_4.X_5.X_{10} \\
& + (-0.61786)*X_4.X_5.X_{11} + (-17.6741)*X_4.X_6.X_{10} + (-18.9117)*X_4.X_6.X_{11} \\
& + (-22.0823)*X_4.X_{10}.X_{11} + (5.2775)*X_5.X_6.X_{10} + (-12.6911)*X_5.X_6.X_{11} + (-5.2227)*X_5.X_{10}.X_{11} \\
& + (4.5443)*X_6.X_{10}.X_{11} + (12.6402)*X_3.X_4.X_4 + (-5.2968)*X_3.X_5.X_5 + (6.7836)*X_3.X_6.X_6 \\
& + (-35.2114)*X_3.X_{10}.X_{10} + (12.8284)*X_3.X_{11}.X_{11} + (-2.4665)*X_4.X_3.X_3 + (-4.9021)*X_4.X_5.X_5 \\
& + (-16.1173)*X_4.X_6.X_6 + (3.4231)*X_4.X_{10}.X_{10} + (-10.8902)*X_4.X_{11}.X_{11} + (6.4092)*X_5.X_3.X_3 \\
& + (-3.1668)*X_5.X_4.X_4 + (-4.052)*X_5.X_6.X_6 + (-20.3914)*X_5.X_{10}.X_{10} + (-1.5911)*X_5.X_{11}.X_{11} \\
& + (4.6361)*X_6.X_3.X_3 + (8.7856)*X_6.X_4.X_4 + (-11.0583)*X_6.X_5.X_5 + (33.6553)*X_6.X_{10}.X_{10} \\
& + (13.0984)*X_6.X_{11}.X_{11} + (-3.0571)*X_{10}.X_3.X_3 + (7.2005)*X_{10}.X_4.X_4 + (-3.1543)*X_{10}.X_5.X_5 \\
& + (-14.1963)*X_{10}.X_6.X_6 + (19.3133)*X_{10}.X_{11}.X_{11} + (8.7465)*X_{11}.X_3.X_3 + (10.4214)*X_{11}.X_4.X_4 \\
& + (-0.21132)*X_{11}.X_5.X_5 + (17.9301)*X_{11}.X_6.X_6 + (20.8943)*X_{11}.X_{10}.X_{10} \\
& + (1.6093)*X_3.X_4.X_5.X_6 + (-3.4963)*X_3.X_4.X_5.X_{10} + (-2.6111)*X_3.X_4.X_5.X_{11} \\
& + (-0.11229)*X_3.X_4.X_6.X_{10} + (2.1081)*X_3.X_4.X_6.X_{11} + (12.3257)*X_3.X_4.X_{10}.X_{11} \\
& + (-0.70281)*X_3.X_5.X_6.X_{10} + (-1.4678)*X_3.X_5.X_6.X_{11} + (7.5853)*X_3.X_5.X_{10}.X_{11} \\
& + (15.4393)*X_3.X_6.X_{10}.X_{11} + (4.6636)*X_4.X_5.X_6.X_{10} + (1.4973)*X_4.X_5.X_6.X_{11} \\
& + (4.4534)*X_4.X_5.X_{10}.X_{11} + (-11.2252)*X_4.X_6.X_{10}.X_{11} + (-3.5771)*X_5.X_6.X_{10}.X_{11} \\
& + (-4.8549)*X_3.X_4.X_5.X_6.X_{10} + (-11.052)*X_3.X_4.X_5.X_6.X_{11} + (-4.2282)*X_3.X_4.X_5.X_{10}.X_{11} \\
& + (4.46)*X_3.X_4.X_6.X_{10}.X_{11} + (1.8665)*X_3.X_5.X_6.X_{10}.X_{11} + (-4.3856)*X_4.X_5.X_6.X_{10}.X_{11}
\end{aligned}$$

Nice

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned}
\sum DH_{(26^\circ C)} (^\circ C.h) = & 50606.0072 + (-1617.2126)*X_1 + (-1223.0402)*X_2 + (-13998.6238)*X_3 \\
& + (12483.4177)*X_4 + (2967.4438)*X_5 + (-18206.9618)*X_6 + (-445.9726)*X_7 + (-1181.7735)*X_8 \\
& + (2772.0563)*X_9 + (-18963.8271)*X_{10} + (-21758.8404)*X_{11} + (-324.3815)*X_3.X_5 \\
& + (-831.8659)*X_3.X_4 + (12614.2916)*X_3.X_{10} + (4978.5416)*X_{10}.X_6 + (-605.383)*X_{10}.X_9 \\
& + (8869.2902)*X_{10}.X_{11} + (1134.5718)*X_{10}.X_5 + (-1890.9726)*X_{10}.X_4 + (-918.088)*X_{11}.X_5 \\
& + (-3581.5049)*X_{11}.X_4 + (486.5536)*X_{11}.X_7 + (-1140.3468)*X_7.X_5 + (-1071.0797)*X_7.X_4 \\
& + (1130.2344)*X_4.X_5
\end{aligned} \tag{A12.9}$$

$$\begin{aligned}
nb-h_{(26^\circ C)} (^\circ C.h) = & 1041.805 + (-12.9034)*X_1 + (-50.3582)*X_2 + (-140.1285)*X_3 + (123.6545)*X_4 \\
& + (19.4219)*X_5 + (-151.8252)*X_6 + (-19.4803)*X_7 + (-42.0156)*X_8 + (47.7546)*X_9 \\
& + (-119.8704)*X_{10} + (-229.5903)*X_{11} + (-0.66435)*X_3.X_5 + (-15.3981)*X_3.X_4 + (3.342)*X_3.X_{10} \\
& + (-31.2147)*X_{10}.X_6 + (8.8003)*X_{10}.X_9 + (-31.1476)*X_{10}.X_{11} + (15.9745)*X_{10}.X_5 \\
& + (27.0532)*X_{10}.X_4 + (-5.6771)*X_{11}.X_5 + (-20.4491)*X_{11}.X_4 + (17.7703)*X_{11}.X_7 \\
& + (32.7431)*X_7.X_5 + (2.5637)*X_7.X_4 + (0.46007)*X_4.X_5
\end{aligned}$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned}
\sum DH_{(26^\circ C)} (^\circ C.h) = & 51553.6034 + (-4976.1941)*X_1 + (-5070.4579)*X_2 + (-15995.4596)*X_3 \\
& + (14265.5277)*X_4 + (2837.9813)*X_5 + (-15176.7208)*X_6 + (-82.7492)*X_7 + (-2216.2198)*X_8 \\
& + (3833.6553)*X_9 + (-19513.6958)*X_{10} + (-22263.8073)*X_{11} + (9657.8808)*X_3.X_{10} \\
& + (2019.982)*X_3.X_6 + (-574.8069)*X_3.X_9 + (6277.1385)*X_3.X_{11} + (-3615.7724)*X_3.X_4 \\
& + (4003.6433)*X_3.X_5 + (4455.1949)*X_2.X_{10} + (259.0256)*X_2.X_6 + (-1132.524)*X_2.X_9 \\
& + (1370.3655)*X_2.X_{11} + (346.1513)*X_2.X_5 + (-541.4074)*X_2.X_4 + (-419.8737)*X_4.X_7 \\
& + (-4935.7496)*X_4.X_{10} + (-3910.3059)*X_4.X_6 + (-282.6906)*X_4.X_9 + (-4760.1254)*X_4.X_{11} \\
& + (2854.8825)*X_4.X_5 + (292.9612)*X_5.X_7 + (2546.3784)*X_5.X_{10} + (-1921.3904)*X_5.X_6 \\
& + (-340.9334)*X_5.X_9 + (-3870.4245)*X_5.X_{11} + (-14.9353)*X_{11}.X_7 + (7185.4252)*X_{11}.X_{10} \\
& + (4524.6131)*X_{11}.X_6 + (-744.7385)*X_{11}.X_9 + (-1581.0462)*X_9.X_{10} + (-2977.9588)*X_9.X_6 \\
& + (61.1255)*X_9.X_8 + (-1202.8807)*X_6.X_7 + (-1862.4592)*X_6.X_{10} + (230.3038)*X_6.X_8 \\
& + (-326.0549)*X_{10}.X_7 + (325.3005)*X_3.X_5
\end{aligned} \tag{A12.10}$$

$$\begin{aligned}
nb-h_{(26^\circ C)} (^\circ C.h) = & 1030.3941 + (-20.5203)*X_1 + (-22.1803)*X_2 + (-128.6589)*X_3 + (114.2792)*X_4 \\
& + (27.4488)*X_5 + (-165.101)*X_6 + (-22.4048)*X_7 + (-24.7824)*X_8 + (41.7671)*X_9 \\
& + (-144.8113)*X_{10} + (-227.4954)*X_{11} + (29.5964)*X_3.X_{10} + (-12.1447)*X_3.X_6 + (-7.0567)*X_3.X_9 \\
& + (14.4274)*X_3.X_{11} + (-8.8663)*X_3.X_4 + (14.7066)*X_3.X_2 + (22.1299)*X_2.X_{10} + (2.7159)*X_2.X_6 \\
& + (14.4479)*X_2.X_9 + (-6.3637)*X_2.X_{11} + (12.0289)*X_2.X_5 + (5.6534)*X_2.X_4 + (-5.7772)*X_4.X_7 \\
& + (1.9181)*X_4.X_{10} + (11.4792)*X_4.X_6 + (-9.3709)*X_4.X_9 + (-5.7885)*X_4.X_{11} + (9.3391)*X_4.X_5 \\
& + (-18.1024)*X_5.X_7 + (29.1392)*X_5.X_{10} + (5.7575)*X_5.X_6 + (-0.9838)*X_5.X_9 + (-27.1039)*X_5.X_{11}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (20.0911)*X_{11}.X_7 + (-11.7922)*X_{11}.X_{10} + (-20.0622)*X_{11}.X_6 + (4.8371)*X_{11}.X_9 \\
& + (8.23)*X_9.X_{10} + (5.0955)*X_9.X_6 + (-10.7584)*X_9.X_8 + (-9.4606)*X_6.X_7 + (-58.8064)*X_6.X_{10} \\
& + (-1.0038)*X_6.X_8 + (-6.8776)*X_{10}.X_7 + (-8.5388)*X_3.X_5
\end{aligned}$$

• **Plan de Box-Behnken**

$$\begin{aligned}
\sum DH_{(26^\circ C)} (^\circ C.h) = & 31045.9781 + (-1422.5527)*X_1 + (-2324.2241)*X_2 + (-11060.1855)*X_3 \\
& + (11631.4276)*X_4 + (3058.7826)*X_5 + (-15444.3724)*X_6 + (-189.311)*X_7 + (-1343.4968)*X_8 \\
& + (3343.0134)*X_9 + (-16815.1959)*X_{10} + (-17619.2766)*X_{11} + (256.2502)*X_1.X_2 \\
& + (1603.4017)*X_1.X_3 + (-575.5783)*X_1.X_4 + (100.2939)*X_1.X_5 + (-1387.6402)*X_1.X_6 \\
& + (162.33)*X_1.X_7 + (144.8357)*X_1.X_8 + (51.8037)*X_1.X_9 + (1294.9978)*X_1.X_{10} \\
& + (1383.9741)*X_1.X_{11} + (784.3906)*X_2.X_3 + (-512.8556)*X_2.X_4 + (175.1241)*X_2.X_5 \\
& + (333.9938)*X_2.X_6 + (207.2634)*X_2.X_7 + (196.0498)*X_2.X_8 + (-56.1864)*X_2.X_9 \\
& + (1857.6334)*X_2.X_{10} + (1134.8924)*X_2.X_{11} + (-3075.0004)*X_3.X_4 + (-1527.5281)*X_3.X_5 \\
& + (1946.4792)*X_3.X_6 + (229.2937)*X_3.X_7 + (605.3883)*X_3.X_8 + (-871.9794)*X_3.X_9 \\
& + (8804.0478)*X_3.X_{10} + (5102.6833)*X_3.X_{11} + (1037.5437)*X_4.X_5 + (-3496.6641)*X_4.X_6 \\
& + (-53.2378)*X_4.X_7 + (-0.1057)*X_4.X_8 + (295.954)*X_4.X_9 + (-4620.7566)*X_4.X_{10} \\
& + (-4470.3127)*X_4.X_{11} + (-1809.199)*X_5.X_6 + (995.0762)*X_5.X_7 + (409.8002)*X_5.X_8 \\
& + (-482.9583)*X_5.X_9 + (1415.6818)*X_5.X_{10} + (-2128.1403)*X_5.X_{11} + (410.3623)*X_6.X_7 \\
& + (-115.6048)*X_6.X_8 + (-961.815)*X_6.X_9 + (-2147.254)*X_6.X_{10} + (3866.2732)*X_6.X_{11} \\
& + (240.957)*X_7.X_8 + (-275.5962)*X_7.X_9 + (-409.0895)*X_7.X_{10} + (367.3687)*X_7.X_{11} \\
& + (-41.9907)*X_8.X_9 + (1176.6688)*X_8.X_{10} + (421.4295)*X_8.X_{11} + (-1143.5082)*X_9.X_{10} \\
& + (-959.858)*X_9.X_{11} + (6476.1331)*X_{10}.X_{11} + (75.8643)*X_1^2 + (-461.0275)*X_2^2 \\
& + (3222.6943)*X_3^2 + (581.4595)*X_4^2 + (-225.885)*X_5^2 + (3890.3161)*X_6^2 + (1297.9299)*X_7^2 \\
& + (-773.5318)*X_8^2 + (-496.0391)*X_9^2 + (8939.6089)*X_{10}^2 + (1990.4545)*X_{11}^2
\end{aligned} \tag{A12.11}$$

$$\begin{aligned}
nb-h_{(26^\circ C)} (^\circ C.h) = & 924.9907 + (-16.3323)*X_1 + (-19.277)*X_2 + (-123.5098)*X_3 + (120.5132)*X_4 \\
& + (32.2713)*X_5 + (-186.5172)*X_6 + (-21.5633)*X_7 + (-18.9833)*X_8 + (40.5686)*X_9 \\
& + (-140.5369)*X_{10} + (-237.0633)*X_{11} + (5.3111)*X_1.X_2 + (4.5613)*X_1.X_3 + (-5.1207)*X_1.X_4 \\
& + (0.30758)*X_1.X_5 + (0.062211)*X_1.X_6 + (2.1568)*X_1.X_7 + (3.0041)*X_1.X_8 + (-1.9401)*X_1.X_9 \\
& + (15.3918)*X_1.X_{10} + (9.5205)*X_1.X_{11} + (11.1073)*X_2.X_3 + (-4.6123)*X_2.X_4 + (-1.0813)*X_2.X_5 \\
& + (-2.1979)*X_2.X_6 + (2.0081)*X_2.X_7 + (1.8736)*X_2.X_8 + (-5.8524)*X_2.X_9 + (6.6615)*X_2.X_{10} \\
& + (2.4954)*X_2.X_{11} + (-8.4731)*X_3.X_4 + (-17.4236)*X_3.X_5 + (-6.0506)*X_3.X_6 + (6.0894)*X_3.X_7 \\
& + (10.8776)*X_3.X_8 + (-7.8385)*X_3.X_9 + (33.1221)*X_3.X_{10} + (27.5107)*X_3.X_{11} + (3.7682)*X_4.X_5 \\
& + (11.5023)*X_4.X_6 + (-6.3961)*X_4.X_7 + (-9.7966)*X_4.X_8 + (0.72251)*X_4.X_9 + (3.5498)*X_4.X_{10} \\
& + (-17.0116)*X_4.X_{11} + (0.96817)*X_5.X_6 + (-2.7613)*X_5.X_7 + (-6.2433)*X_5.X_8 + (-3.2645)*X_5.X_9 \\
& + (23.0732)*X_5.X_{10} + (-20.3333)*X_5.X_{11} + (4.1493)*X_6.X_7 + (1.0023)*X_6.X_8 + (0.42303)*X_6.X_9 \\
& + (-63.6855)*X_6.X_{10} + (-27.9523)*X_6.X_{11} + (0.85648)*X_7.X_8 + (-3.9479)*X_7.X_9 \\
& + (-2.6282)*X_7.X_{10} + (23.0295)*X_7.X_{11} + (-4.9117)*X_8.X_9 + (7.1166)*X_8.X_{10} + (8.8189)*X_8.X_{11} \\
& + (-1.068)*X_9.X_{10} + (0.33333)*X_9.X_{11} + (-8.1033)*X_{10}.X_{11} + (-0.85675)*X_1^2 + (4.7756)*X_2^2 \\
& + (25.0271)*X_3^2 + (-9.7435)*X_4^2 + (-0.32955)*X_5^2 + (55.2995)*X_6^2 + (1.7872)*X_7^2 \\
& + (-0.069522)*X_8^2 + (3.6922)*X_9^2 + (54.6807)*X_{10}^2 + (-14.0921)*X_{11}^2
\end{aligned}$$

• **Plan de couplage : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

$$\begin{aligned}
\sum DH_{(26^\circ C)} (^\circ C.h) = & 30019.7375 + (-672.4578)*X_1 + (-1148.3546)*X_2 + (-7830.8817)*X_3 \\
& + (10125.3414)*X_4 + (3216.6292)*X_5 + (-15726.0898)*X_6 + (-49.5142)*X_7 + (-1542.1097)*X_8 \\
& + (3589.6492)*X_9 + (-15501.3633)*X_{10} + (-14583.7529)*X_{11} + (433.0346)*X_1.X_2 \\
& + (1436.2358)*X_1.X_3 + (-967.0902)*X_1.X_4 + (121.4569)*X_1.X_5 + (87.4296)*X_1.X_6 \\
& + (66.1036)*X_1.X_7 + (90.7297)*X_1.X_8 + (-252.8717)*X_1.X_9 + (1852.995)*X_1.X_{10} \\
& + (1221.8276)*X_1.X_{11} + (1704.3232)*X_2.X_3 + (-939.3471)*X_2.X_4 + (208.427)*X_2.X_5 \\
& + (17.9629)*X_2.X_6 + (-282.7883)*X_2.X_7 + (450.14)*X_2.X_8 + (-719.2813)*X_2.X_9 \\
& + (2657.0152)*X_2.X_{10} + (1567.8814)*X_2.X_{11} + (-3421.463)*X_3.X_4 + (-1486.3858)*X_3.X_5 \\
& + (2036.4087)*X_3.X_6 + (14.8518)*X_3.X_7 + (1111.3694)*X_3.X_8 + (-948.5978)*X_3.X_9 \\
& + (8659.176)*X_3.X_{10} + (5846.6425)*X_3.X_{11} + (1392.7472)*X_4.X_5 + (-3528.7551)*X_4.X_6 \\
& + (33.0529)*X_4.X_7 + (-330.3035)*X_4.X_8 + (517.4034)*X_4.X_9 + (-4660.079)*X_4.X_{10} \\
& + (-5192.9574)*X_4.X_{11} + (-1819.935)*X_5.X_6 + (-82.3889)*X_5.X_7 + (492.0585)*X_5.X_8 \\
& + (349.9415)*X_5.X_9 + (1317.4994)*X_5.X_{10} + (-2624.3441)*X_5.X_{11} + (790.3509)*X_6.X_7 \\
& + (154.4575)*X_6.X_8 + (103.0385)*X_6.X_9 + (-1824.666)*X_6.X_{10} + (4488.3244)*X_6.X_{11} \\
& + (80.5706)*X_7.X_8 + (248.6867)*X_7.X_9 + (-123.1568)*X_7.X_{10} + (10.7869)*X_7.X_{11} \\
& + (-324.7172)*X_8.X_9 + (1469.4024)*X_8.X_{10} + (658.5412)*X_8.X_{11} + (-1447.101)*X_9.X_{10} \\
& + (-1008.1091)*X_9.X_{11} + (7108.8771)*X_{10}.X_{11} + (3672.4776)*X_3.X_3 + (986.8784)*X_4.X_4 \\
& + (201.1502)*X_5.X_5 + (4206.2099)*X_6.X_6 + (9527.689)*X_{10}.X_{10} + (2360.6801)*X_{11}.X_{11} \\
& + (-953.6935)*X_1.X_2.X_3 + (496.8997)*X_1.X_2.X_4 + (-615.4214)*X_1.X_2.X_5 + (35.9607)*X_1.X_2.X_6 \\
& + (-73.866)*X_1.X_2.X_{10} + (-289.4697)*X_1.X_2.X_{11} + (512.6354)*X_1.X_3.X_4 + (-279.0167)*X_1.X_3.X_5 \\
& + (231.9694)*X_1.X_3.X_6 + (-1261.0149)*X_1.X_3.X_{10} + (-252.8986)*X_1.X_3.X_{11} \\
& + (-65.1552)*X_1.X_4.X_5 + (-351.8462)*X_1.X_4.X_6 + (653.4672)*X_1.X_4.X_{10} + (153.6213)*X_1.X_4.X_{11} \\
& + (79.5478)*X_1.X_5.X_6 + (-436.8194)*X_1.X_5.X_{10} + (329.7233)*X_1.X_5.X_{11} \\
& + (350.4922)*X_1.X_6.X_{10} + (246.7403)*X_1.X_6.X_{11} + (-591.908)*X_1.X_{10}.X_{11} \\
& + (-397.7572)*X_2.X_3.X_4 + (129.8462)*X_2.X_3.X_5 + (-189.9552)*X_2.X_3.X_6
\end{aligned} \tag{A12.12}$$

$+ (-2075.4003)*X2.X3.X10 + (-663.0568)*X2.X3.X11 + (167.8634)*X2.X4.X5$
 $+ (-88.7838)*X2.X4.X6 + (441.4113)*X2.X4.X10 + (83.0888)*X2.X4.X11 + (-367.4264)*X2.X5.X6$
 $+ (10.5166)*X2.X5.X10 + (481.7132)*X2.X5.X11 + (310.0152)*X2.X6.X10$
 $+ (755.5957)*X2.X6.X11 + (-833.8845)*X2.X10.X11 + (-655.9601)*X3.X4.X5$
 $+ (270.9561)*X3.X4.X6 + (2162.3049)*X3.X4.X10 + (738.6176)*X3.X4.X11$
 $+ (-33.5095)*X3.X5.X6 + (85.0227)*X3.X5.X10 + (1100.4203)*X3.X5.X11$
 $+ (884.1681)*X3.X6.X10 + (-215.2134)*X3.X6.X11 + (-2981.6019)*X3.X10.X11$
 $+ (-514.6092)*X4.X5.X6 + (192.5595)*X4.X5.X10 + (-838.851)*X4.X5.X11$
 $+ (-720.3574)*X4.X6.X10 + (659.4139)*X4.X6.X11 + (1022.7995)*X4.X10.X11$
 $+ (-417.4324)*X5.X6.X10 + (751.5032)*X5.X6.X11 + (382.2161)*X5.X10.X11$
 $+ (1384.7554)*X6.X10.X11 + (966.5827)*X1.X2.X2 + (-695.1256)*X1.X3.X3$
 $+ (-347.3946)*X1.X4.X4 + (-275.6654)*X1.X5.X5 + (131.804)*X1.X6.X6$
 $+ (-502.7187)*X1.X10.X10 + (-743.3073)*X1.X11.X11 + (-213.4791)*X2.X1.X1$
 $+ (-532.6958)*X2.X3.X3 + (-339.4017)*X2.X4.X4 + (-22.9223)*X2.X5.X5 + (85.9684)*X2.X6.X6$
 $+ (-1653.6354)*X2.X10.X10 + (-52.9549)*X2.X11.X11 + (212.6474)*X3.X1.X1$
 $+ (421.3469)*X3.X2.X2 + (-299.5297)*X3.X4.X4 + (-1137.3719)*X3.X5.X5$
 $+ (-1499.4789)*X3.X6.X6 + (-4891.2963)*X3.X10.X10 + (-971.1891)*X3.X11.X11$
 $+ (1042.3819)*X4.X1.X1 + (-250.092)*X4.X2.X2 + (1711.6936)*X4.X3.X3$
 $+ (718.0582)*X4.X5.X5 + (-106.2762)*X4.X6.X6 + (850.3732)*X4.X10.X10$
 $+ (-61.3757)*X4.X11.X11 + (-731.5766)*X5.X1.X1 + (-773.7382)*X5.X2.X2$
 $+ (1766.6567)*X5.X3.X3 + (-1177.1946)*X5.X4.X4 + (1149.5157)*X5.X6.X6$
 $+ (-1320.4457)*X5.X10.X10 + (726.2343)*X5.X11.X11 + (-242.6502)*X6.X1.X1$
 $+ (-741.3406)*X6.X2.X2 + (419.2592)*X6.X3.X3 + (-177.9692)*X6.X4.X4 + (275.9745)*X6.X5.X5$
 $+ (1336.8903)*X6.X10.X10 + (-105.501)*X6.X11.X11 + (-616.0715)*X10.X1.X1$
 $+ (123.5075)*X10.X2.X2 + (-3338.9589)*X10.X3.X3 + (743.5625)*X10.X4.X4$
 $+ (-944.5307)*X10.X5.X5 + (316.8933)*X10.X6.X6 + (664.6057)*X10.X11.X11$
 $+ (407.3884)*X11.X1.X1 + (-255.3863)*X11.X2.X2 + (-2377.665)*X11.X3.X3$
 $+ (-1926.7401)*X11.X4.X4 + (821.7914)*X11.X5.X5 + (-504.4103)*X11.X6.X6$
 $+ (-3804.0191)*X11.X10.X10$

nb-h_(26°C) (°C.h) = $931.665 + (-20.3603)*X1 + (-18.3589)*X2 + (-120.2872)*X3 + (121.9875)*X4$
 $+ (36.4013)*X5 + (-204.863)*X6 + (-18.8677)*X7 + (-21.3548)*X8 + (40.5802)*X9$
 $+ (-137.5499)*X10 + (-242.3566)*X11 + (3.4884)*X1.X2 + (8.0027)*X1.X3 + (-7.2091)*X1.X4$
 $+ (4.7476)*X1.X5 + (-7.4877)*X1.X6 + (0.73804)*X1.X7 + (2.2249)*X1.X8 + (-5.5643)*X1.X9$
 $+ (0.2635)*X1.X10 + (8.9307)*X1.X11 + (9.8236)*X2.X3 + (-2.399)*X2.X4 + (1.7046)*X2.X5$
 $+ (0.45907)*X2.X6 + (2.0085)*X2.X7 + (2.5878)*X2.X8 + (2.2313)*X2.X9 + (8.2357)*X2.X10$
 $+ (2.0633)*X2.X11 + (-9.9673)*X3.X4 + (-13.7129)*X3.X5 + (-10.332)*X3.X6 + (4.2582)*X3.X7$
 $+ (8.9151)*X3.X8 + (-6.778)*X3.X9 + (27.8882)*X3.X10 + (18.7947)*X3.X11 + (0.0017431)*X4.X5$
 $+ (10.5769)*X4.X6 + (-8.5908)*X4.X7 + (-5.8375)*X4.X8 + (-1.4271)*X4.X9 + (2.7944)*X4.X10$
 $+ (-14.3727)*X4.X11 + (5.0187)*X5.X6 + (0.16287)*X5.X7 + (1.5786)*X5.X8 + (-4.0347)*X5.X9$
 $+ (21.828)*X5.X10 + (-18.7588)*X5.X11 + (-0.39462)*X6.X7 + (-1.4515)*X6.X8$
 $+ (-0.80473)*X6.X9 + (-60.3993)*X6.X10 + (-21.078)*X6.X11 + (1.9016)*X7.X8$
 $+ (-0.34271)*X7.X9 + (-4.0427)*X7.X10 + (19.3221)*X7.X11 + (-4.9855)*X8.X9 + (5.0502)*X8.X10$
 $+ (4.7095)*X8.X11 + (-1.7244)*X9.X10 + (5.9614)*X9.X11 + (-11.3976)*X10.X11$
 $+ (23.8652)*X3.X3 + (-10.9362)*X4.X4 + (-1.9734)*X5.X5 + (53.5859)*X6.X6$
 $+ (52.8629)*X10.X10 + (-15.5307)*X11.X11 + (-0.11185)*X2.X3.X4 + (-1.2999)*X2.X3.X5$
 $+ (-2.7188)*X2.X3.X6 + (-0.18807)*X2.X3.X10 + (-1.0182)*X2.X3.X11 + (2.5443)*X2.X4.X5$
 $+ (-1.3929)*X2.X4.X6 + (-1.5674)*X2.X4.X10 + (-0.91596)*X2.X4.X11 + (-3.5553)*X2.X5.X6$
 $+ (-7.6616)*X2.X5.X10 + (1.0687)*X2.X5.X11 + (1.3101)*X2.X6.X10 + (-4.2302)*X2.X6.X11$
 $+ (-2.2735)*X2.X10.X11 + (-2.3216)*X3.X4.X5 + (-10.346)*X3.X4.X6 + (-8.1853)*X3.X4.X10$
 $+ (8.6712)*X3.X4.X11 + (-0.89892)*X3.X5.X6 + (-0.31128)*X3.X5.X10 + (9.3064)*X3.X5.X11$
 $+ (6.1374)*X3.X6.X10 + (20.5448)*X3.X6.X11 + (7.3881)*X3.X10.X11 + (5.0124)*X4.X5.X6$
 $+ (1.3292)*X4.X5.X10 + (1.847)*X4.X5.X11 + (3.6783)*X4.X6.X10 + (-18.9841)*X4.X6.X11$
 $+ (-8.2622)*X4.X10.X11 + (4.5712)*X5.X6.X10 + (-8.4082)*X5.X6.X11 + (0.40311)*X5.X10.X11$
 $+ (-5.2319)*X6.X10.X11 + (-4.7265)*X3.X4.X4 + (2.3571)*X3.X5.X5 + (15.2123)*X3.X6.X6$
 $+ (-16.5331)*X3.X10.X10 + (-5.606)*X3.X11.X11 + (4.7101)*X4.X3.X3 + (0.28094)*X4.X5.X5$
 $+ (-11.443)*X4.X6.X6 + (-2.588)*X4.X10.X10 + (4.1151)*X4.X11.X11 + (4.3405)*X5.X3.X3$
 $+ (-3.6593)*X5.X4.X4 + (4.9573)*X5.X6.X6 + (-9.3778)*X5.X10.X10 + (-6.3871)*X5.X11.X11$
 $+ (10.1272)*X6.X3.X3 + (3.7137)*X6.X4.X4 + (-6.4231)*X6.X5.X5 + (6.4122)*X6.X10.X10$
 $+ (28.8179)*X6.X11.X11 + (-2.6612)*X10.X3.X3 + (0.025979)*X10.X4.X4 + (-1.415)*X10.X5.X5$
 $+ (-4.7105)*X10.X6.X6 + (1.8924)*X10.X11.X11 + (-4.5093)*X11.X3.X3 + (4.9511)*X11.X4.X4$
 $+ (-1.7079)*X11.X5.X5 + (6.2744)*X11.X6.X6 + (6.9247)*X11.X10.X10 + (-4.4041)*X3.X4.X5.X6$
 $+ (-3.0112)*X3.X4.X5.X10 + (4.5626)*X3.X4.X5.X11 + (-3.5419)*X3.X4.X6.X10$
 $+ (9.0619)*X3.X4.X6.X11 + (8.8237)*X3.X4.X10.X11 + (0.8806)*X3.X5.X6.X10$
 $+ (5.0934)*X3.X5.X6.X11 + (3.9198)*X3.X5.X10.X11 + (6.2939)*X3.X6.X10.X11$
 $+ (2.6252)*X4.X5.X6.X10 + (-0.55297)*X4.X5.X6.X11 + (4.1034)*X4.X5.X10.X11$
 $+ (-4.0052)*X4.X6.X10.X11 + (-4.0102)*X5.X6.X10.X11 + (3.7025)*X3.X4.X5.X6.X10$
 $+ (-5.3708)*X3.X4.X5.X6.X11 + (-5.3937)*X3.X4.X5.X10.X11 + (6.6087)*X3.X4.X6.X10.X11$
 $+ (-3.1525)*X3.X5.X6.X10.X11 + (7.1768)*X4.X5.X6.X10.X11$

Annexe A13 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation de la consommation d'énergie finale annuelle des auxiliaires de la surventilation mécanique nocturne

Nancy

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & 0.78491 + (0.016569)*X_1 + (-0.043181)*X_2 \\ & + (-0.16802)*X_3 + (0.12109)*X_4 + (-0.0037125)*X_5 + (0.11693)*X_6 + (-0.0042371)*X_7 \\ & + (-0.041484)*X_8 + (0.036066)*X_9 + (0.78491)*X_{10} + (-0.16517)*X_{11} + (-0.011923)*X_3.X_5 \\ & + (-0.043181)*X_3.X_4 + (-0.16802)*X_3.X_{10} + (0.11693)*X_{10}.X_6 + (0.036066)*X_{10}.X_9 \\ & + (-0.16517)*X_{10}.X_{11} + (-0.0037125)*X_{10}.X_5 + (0.12109)*X_{10}.X_4 + (-0.012196)*X_{11}.X_5 \\ & + (-0.041484)*X_{11}.X_4 + (0.012828)*X_{11}.X_7 + (0.055823)*X_7.X_5 + (0.016569)*X_7.X_4 \\ & + (-0.0031718)*X_4.X_5 \end{aligned} \quad (A13.1)$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & 0.78119 + (-0.004874)*X_1 + (-0.030701)*X_2 \\ & + (-0.10988)*X_3 + (0.11417)*X_4 + (0.0027389)*X_5 + (0.11143)*X_6 + (0.0045648)*X_7 \\ & + (-0.025068)*X_8 + (0.038883)*X_9 + (0.78119)*X_{10} + (-0.11318)*X_{11} + (-0.10988)*X_3.X_{10} \\ & + (-0.046401)*X_3.X_6 + (-0.052378)*X_3.X_9 + (0.00053723)*X_3.X_{11} + (-0.022464)*X_3.X_4 \\ & + (-0.004874)*X_3.X_2 + (-0.030701)*X_2.X_{10} + (-0.013475)*X_2.X_6 + (0.0070562)*X_3.X_7 \\ & + (0.00076404)*X_2.X_{11} + (-0.0011065)*X_2.X_5 + (-0.0001638)*X_2.X_4 + (0.013475)*X_4.X_7 \\ & + (0.11417)*X_4.X_{10} + (0.052378)*X_4.X_6 + (0.046401)*X_4.X_9 + (-0.0069428)*X_4.X_{11} \\ & + (0.009102)*X_4.X_5 + (-0.0039141)*X_5.X_7 + (0.0027389)*X_5.X_{10} + (0.029729)*X_5.X_6 \\ & + (-0.0042188)*X_5.X_9 + (-0.010983)*X_5.X_{11} + (0.0088294)*X_{11}.X_7 + (-0.11318)*X_{11}.X_{10} \\ & + (-0.053146)*X_{11}.X_6 + (0.0050562)*X_{11}.X_9 + (0.038883)*X_9.X_{10} + (0.022464)*X_9.X_6 \\ & + (-0.0081833)*X_9.X_8 + (0.0001638)*X_6.X_7 + (0.11143)*X_6.X_{10} + (-0.0088294)*X_6.X_8 \\ & + (0.0045648)*X_{10}.X_7 + (-0.025068)*X_3.X_5 \end{aligned} \quad (A13.2)$$

• Plan de Box-Behnken

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & .0734 + (-0.019547)*X_1 + (-0.035258)*X_2 \\ & + (-0.15423)*X_3 + (0.12755)*X_4 + (-0.015946)*X_5 + (0.11835)*X_6 + (0.0046813)*X_7 \\ & + (-0.017241)*X_8 + (0.032949)*X_9 + (0.82182)*X_{10} + (-0.12714)*X_{11} + (0.0013986)*X_1.X_2 \\ & + (-0.027388)*X_1.X_3 + (-0.0027715)*X_1.X_4 + (0.0072111)*X_1.X_5 + (-0.006363)*X_1.X_6 \\ & + (-0.0043407)*X_1.X_7 + (0.00070415)*X_1.X_8 + (-0.0024323)*X_1.X_9 + (-0.0083437)*X_1.X_{10} \\ & + (-0.022182)*X_1.X_{11} + (0.0015384)*X_2.X_3 + (0.0045452)*X_2.X_4 + (0.010185)*X_2.X_5 \\ & + (-0.010538)*X_2.X_6 + (-0.0063907)*X_2.X_7 + (-0.00034217)*X_2.X_8 + (-0.0026683)*X_2.X_9 \\ & + (-0.029788)*X_2.X_{10} + (-0.0016721)*X_2.X_{11} + (0.003492)*X_3.X_4 + (-0.0061102)*X_3.X_5 \\ & + (-0.056677)*X_3.X_6 + (0.0004535)*X_3.X_7 + (0.0040335)*X_3.X_8 + (0.0055606)*X_3.X_9 \\ & + (-0.11826)*X_3.X_{10} + (-0.0085004)*X_3.X_{11} + (0.00054028)*X_4.X_5 + (0.054412)*X_4.X_6 \\ & + (-0.0040455)*X_4.X_7 + (-0.00089905)*X_4.X_8 + (-0.0059688)*X_4.X_9 + (0.11178)*X_4.X_{10} \\ & + (0.00057928)*X_4.X_{11} + (0.01538)*X_5.X_6 + (-0.0014831)*X_5.X_7 + (-0.00070776)*X_5.X_8 \\ & + (-0.0058606)*X_5.X_9 + (-0.010126)*X_5.X_{10} + (-0.0078976)*X_5.X_{11} + (-0.0020964)*X_6.X_7 \\ & + (-0.0060379)*X_6.X_8 + (0.014188)*X_6.X_9 + (0.10947)*X_6.X_{10} + (-0.066536)*X_6.X_{11} \\ & + (-0.011555)*X_7.X_8 + (0.0013428)*X_7.X_9 + (0.0025098)*X_7.X_{10} + (-0.0029381)*X_7.X_{11} \\ & + (-0.00075412)*X_8.X_9 + (-0.013991)*X_8.X_{10} + (5.5223e-005)*X_8.X_{11} + (0.030441)*X_9.X_{10} \\ & + (0.0085388)*X_9.X_{11} + (-0.1115)*X_{10}.X_{11} + (-0.0014216)*X_1^2 + (-0.0043139)*X_2^2 \\ & + (0.02401)*X_3^2 + (-0.016183)*X_4^2 + (-0.0029391)*X_5^2 + (-0.076001)*X_6^2 + (-0.0027322)*X_7^2 \\ & + (-0.0063422)*X_8^2 + (-0.0008964)*X_9^2 + (-0.21021)*X_{10}^2 + (-0.016737)*X_{11}^2 \end{aligned} \quad (A13.3)$$

• Plan de couplage n^2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & 1.0614 + (-0.017313)*X_1 + (-0.033164)*X_2 \\ & + (-0.18464)*X_3 + (0.13773)*X_4 + (-0.024726)*X_5 + (0.12608)*X_6 + (0.0031384)*X_7 \\ & + (-0.016294)*X_8 + (0.035398)*X_9 + (0.84601)*X_{10} + (-0.13718)*X_{11} + (4.4832e-005)*X_1.X_2 \\ & + (0.0034815)*X_1.X_3 + (-0.004819)*X_1.X_4 + (0.0035566)*X_1.X_5 + (-0.0029474)*X_1.X_6 \end{aligned} \quad (A13.4)$$

+ (-0.0018813)*X1.X7 + (6.9003e-005)*X1.X8 + (0.0036942)*X1.X9 + (-0.0093301)*X1.X10
+ (0.0050731)*X1.X11 + (0.0020287)*X2.X3 + (0.00035937)*X2.X4 + (0.0018675)*X2.X5
+ (-0.013584)*X2.X6 + (0.00029352)*X2.X7 + (-0.0017067)*X2.X8 + (0.0016639)*X2.X9
+ (-0.032752)*X2.X10 + (0.00039733)*X2.X11 + (-0.01013)*X3.X4 + (-0.0098165)*X3.X5
+ (-0.051125)*X3.X6 + (0.0010556)*X3.X7 + (0.0041318)*X3.X8 + (0.0048796)*X3.X9
+ (-0.11546)*X3.X10 + (-5.6277e-005)*X3.X11 + (0.0012252)*X4.X5 + (0.052445)*X4.X6
+ (-0.00050815)*X4.X7 + (0.00040409)*X4.X8 + (-0.0063099)*X4.X9 + (0.11411)*X4.X10
+ (-0.00556)*X4.X11 + (0.023706)*X5.X6 + (0.00085671)*X5.X7 + (0.0044822)*X5.X8
+ (-0.0054132)*X5.X9 + (-0.0028155)*X5.X10 + (-0.0079692)*X5.X11 + (-0.0046808)*X6.X7
+ (-0.006377)*X6.X8 + (0.013925)*X6.X9 + (0.11174)*X6.X10 + (-0.058744)*X6.X11
+ (-0.0052639)*X7.X8 + (0.0025441)*X7.X9 + (4.2729e-005)*X7.X10 + (-0.0018314)*X7.X11
+ (-0.0012174)*X8.X9 + (-0.015452)*X8.X10 + (0.00086126)*X8.X11 + (0.031019)*X9.X10
+ (0.0046166)*X9.X11 + (-0.11385)*X10.X11 + (0.023172)*X3.X3 + (-0.011067)*X4.X4
+ (-0.072774)*X6.X6 + (-0.20803)*X10.X10 + (-0.012014)*X11.X11 + (-0.005154)*X2.X3.X4
+ (-0.0017721)*X2.X3.X5 + (-0.00065594)*X2.X3.X6 + (0.0085865)*X2.X3.X10
+ (0.00529)*X2.X3.X11 + (-0.0036057)*X2.X4.X5 + (-0.00037583)*X2.X4.X6
+ (-0.0039951)*X2.X4.X10 + (-0.00063081)*X2.X4.X11 + (-0.00080569)*X2.X5.X6
+ (0.0084565)*X2.X5.X10 + (-0.0063388)*X2.X5.X11 + (-0.013082)*X2.X6.X10
+ (-0.0014931)*X2.X6.X11 + (0.0022638)*X2.X10.X11 + (0.0005056)*X3.X4.X5
+ (-0.009585)*X3.X4.X6 + (-0.0020005)*X3.X4.X10 + (-0.0083599)*X3.X4.X11
+ (-0.0088424)*X3.X5.X6 + (-0.0079078)*X3.X5.X10 + (0.0005148)*X3.X5.X11
+ (-0.052727)*X3.X6.X10 + (0.006906)*X3.X6.X11 + (0.0050899)*X3.X10.X11
+ (0.0039515)*X4.X5.X6 + (0.0019768)*X4.X5.X10 + (0.002656)*X4.X5.X11
+ (0.05882)*X4.X6.X10 + (-0.0074006)*X4.X6.X11 + (-0.0063995)*X4.X10.X11
+ (0.029157)*X5.X6.X10 + (-0.0036304)*X5.X6.X11 + (-0.0056223)*X5.X10.X11
+ (-0.058426)*X6.X10.X11 + (0.0022026)*X3.X4.X4 + (0.0022314)*X3.X5.X5
+ (0.0062636)*X3.X6.X6 + (0.057325)*X3.X10.X10 + (0.0090176)*X3.X11.X11
+ (-0.0032864)*X4.X3.X3 + (-0.0017204)*X4.X5.X5 + (-0.0024143)*X4.X6.X6
+ (-0.023414)*X4.X10.X10 + (0.0050448)*X4.X11.X11 + (0.01199)*X5.X3.X3
+ (-0.0028179)*X5.X4.X4 + (0.0034883)*X5.X6.X6 + (0.0098297)*X5.X10.X10
+ (0.0022825)*X5.X11.X11 + (0.0077623)*X6.X3.X3 + (0.0030012)*X6.X4.X4
+ (-0.0084196)*X6.X5.X5 + (-0.020708)*X6.X10.X10 + (0.0035375)*X6.X11.X11
+ (0.022607)*X10.X3.X3 + (-0.0037913)*X10.X4.X4 + (-0.004196)*X10.X5.X5
+ (-0.072791)*X10.X6.X6 + (-0.0056667)*X10.X11.X11 + (0.0050468)*X11.X3.X3
+ (0.0032356)*X11.X4.X4 + (0.00062527)*X11.X5.X5 + (-0.01252)*X11.X6.X6
+ (0.026623)*X11.X10.X10

Agen

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

Consommation auxiliaires (kWh/m².an) = $1.41 + (0.024043)*X1 + (-0.027825)*X2 + (-0.184)*X3$
+ (0.13337)*X4 + (-0.015697)*X5 + (0.1679)*X6 + (0.015385)*X7 + (-0.028512)*X8
+ (0.049273)*X9 + (1.41)*X10 + (-0.21965)*X11 + (-0.0077148)*X3.X5 + (-0.027825)*X3.X4
+ (-0.184)*X3.X10 + (0.1679)*X10.X6 + (0.049273)*X10.X9 + (-0.21965)*X10.X11
+ (-0.015697)*X10.X5 + (0.13337)*X10.X4 + (-0.012049)*X11.X5 + (-0.028512)*X11.X4
+ (0.020466)*X11.X7 + (0.046787)*X7.X5 + (0.024043)*X7.X4 + (0.01171)*X4.X5

(A13.5)

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

Consommation auxiliaires (kWh/m².an) = $1.4141 + (0.0013362)*X1 + (-0.018041)*X2$
+ (-0.11297)*X3 + (0.13427)*X4 + (-0.0067967)*X5 + (0.18007)*X6 + (0.0094829)*X7
+ (-0.025977)*X8 + (0.04654)*X9 + (1.4141)*X10 + (-0.17427)*X11 + (-0.11297)*X3.X10
+ (-0.033719)*X3.X6 + (-0.052704)*X3.X9 + (-0.010726)*X3.X11 + (-0.023592)*X3.X4
+ (0.0013362)*X3.X2 + (-0.018041)*X2.X10 + (-0.0057841)*X2.X6 + (0.0036478)*X3.X7
+ (0.00067755)*X2.X11 + (-0.0095814)*X2.X5 + (0.0017108)*X2.X4 + (0.0057841)*X4.X7
+ (0.13427)*X4.X10 + (0.052704)*X4.X6 + (0.033719)*X4.X9 + (0.011003)*X4.X11
+ (0.01043)*X4.X5 + (-0.0012285)*X5.X7 + (-0.0067967)*X5.X10 + (0.034416)*X5.X6
+ (-0.0049136)*X5.X9 + (-0.011272)*X5.X11 + (0.0065791)*X11.X7 + (-0.17427)*X11.X10
+ (-0.062653)*X11.X6 + (0.012899)*X11.X9 + (0.04654)*X9.X10 + (0.023592)*X9.X6
+ (-0.0052778)*X9.X8 + (-0.0017108)*X6.X7 + (0.18007)*X6.X10 + (-0.0065791)*X6.X8
+ (0.0094829)*X10.X7 + (-0.025977)*X3.X5

(A13.6)

• Plan de Box-Behnken

Consommation auxiliaires (kWh/m².an) = $1.7814 + (-0.01803)*X1 + (-0.033382)*X2$

(A13.7)

+ (-0.1457)*X3 + (0.13269)*X4 + (-0.025471)*X5 + (0.17732)*X6 + (0.0057659)*X7
+ (-0.014037)*X8 + (0.034164)*X9 + (1.4725)*X10 + (-0.16444)*X11 + (-0.00056294)*X1.X2
+ (-0.028917)*X1.X3 + (-0.0015184)*X1.X4 + (0.0060193)*X1.X5 + (-0.014639)*X1.X6
+ (-0.0029646)*X1.X7 + (-0.0063463)*X1.X8 + (-0.0018424)*X1.X9 + (-0.010298)*X1.X10
+ (-0.021281)*X1.X11 + (0.0032559)*X2.X3 + (0.00032289)*X2.X4 + (0.013656)*X2.X5
+ (-0.0071274)*X2.X6 + (-0.0028382)*X2.X7 + (-0.00091012)*X2.X8 + (-0.0040078)*X2.X9
+ (-0.0295)*X2.X10 + (-0.0054395)*X2.X11 + (0.012322)*X3.X4 + (-0.012132)*X3.X5
+ (-0.039641)*X3.X6 + (0.0029287)*X3.X7 + (0.0030649)*X3.X8 + (-0.00045024)*X3.X9
+ (-0.12733)*X3.X10 + (-0.021613)*X3.X11 + (0.0080374)*X4.X5 + (0.033058)*X4.X6
+ (-0.0062302)*X4.X7 + (-0.005366)*X4.X8 + (-0.01077)*X4.X9 + (0.13213)*X4.X10
+ (0.011871)*X4.X11 + (0.02752)*X5.X6 + (0.0047507)*X5.X7 + (0.0078727)*X5.X8
+ (-0.0077685)*X5.X9 + (-0.018726)*X5.X10 + (-0.014946)*X5.X11 + (-0.0068584)*X6.X7
+ (-0.0050427)*X6.X8 + (0.012279)*X6.X9 + (0.19166)*X6.X10 + (-0.045758)*X6.X11
+ (-0.0048165)*X7.X8 + (0.0016347)*X7.X9 + (0.0090001)*X7.X10 + (-0.0011619)*X7.X11
+ (-0.0018441)*X8.X9 + (-0.0094491)*X8.X10 + (0.0034092)*X8.X11 + (0.038298)*X9.X10
+ (0.01653)*X9.X11 + (-0.1729)*X10.X11 + (0.0036518)*X1² + (-0.00057178)*X2²
+ (0.021109)*X3² + (-0.024367)*X4² + (-0.010786)*X5² + (-0.10528)*X6² + (0.0022266)*X7²
+ (-0.0012729)*X8² + (-0.0087941)*X9² + (-0.24862)*X10² + (-0.026745)*X11²

• **Plan de couplage n°2 : plan de Box-Behnken + composite L₆₄(2⁶³) + Taguchi L₃₂(2³¹) + Taguchi L₈₁(3⁴⁰)**

Consommation auxiliaires (kWh/m².an) = 1.7671 + (-0.017389)*X1 + (-0.02937)*X2
+ (-0.16607)*X3 + (0.1342)*X4 + (-0.034896)*X5 + (0.17565)*X6 + (0.0071126)*X7
+ (-0.016064)*X8 + (0.040429)*X9 + (1.5119)*X10 + (-0.15807)*X11 + (0.0020191)*X1.X2
+ (0.0061801)*X1.X3 + (0.00096264)*X1.X4 + (0.0010685)*X1.X5 + (-0.00078069)*X1.X6
+ (-0.0048302)*X1.X7 + (-0.0051814)*X1.X8 + (0.0017391)*X1.X9 + (-0.006116)*X1.X10
+ (0.0031155)*X1.X11 + (0.0051961)*X2.X3 + (-0.00033581)*X2.X4 + (0.00069319)*X2.X5
+ (-0.0087227)*X2.X6 + (0.0015759)*X2.X7 + (0.001537)*X2.X8 + (-0.0027644)*X2.X9
+ (-0.025295)*X2.X10 + (0.00025743)*X2.X11 + (-0.0070039)*X3.X4 + (-0.012151)*X3.X5
+ (-0.038791)*X3.X6 + (-0.00095678)*X3.X7 + (0.0052654)*X3.X8 + (0.0031682)*X3.X9
+ (-0.12622)*X3.X10 + (-0.013588)*X3.X11 + (0.006906)*X4.X5 + (0.045086)*X4.X6
+ (-3.6019e-005)*X4.X7 + (-0.0032577)*X4.X8 + (-0.0080714)*X4.X9 + (0.13307)*X4.X10
+ (0.0058725)*X4.X11 + (0.033236)*X5.X6 + (0.00073915)*X5.X7 + (0.0086328)*X5.X8
+ (-0.008823)*X5.X9 + (-0.014029)*X5.X10 + (-0.014626)*X5.X11 + (-0.0043617)*X6.X7
+ (-0.0042561)*X6.X8 + (0.016589)*X6.X9 + (0.18285)*X6.X10 + (-0.057011)*X6.X11
+ (-0.0015149)*X7.X8 + (0.00074545)*X7.X9 + (0.005838)*X7.X10 + (0.0022331)*X7.X11
+ (-0.0015746)*X8.X9 + (-0.012285)*X8.X10 + (0.0016025)*X8.X11 + (0.039843)*X9.X10
+ (0.010478)*X9.X11 + (-0.17435)*X10.X11 + (0.025032)*X3.X3 + (-0.017424)*X4.X4
+ (-0.099521)*X6.X6 + (-0.24372)*X10.X10 + (-0.023247)*X11.X11 + (-0.0044721)*X2.X3.X4
+ (0.0065963)*X2.X3.X5 + (0.0039071)*X2.X3.X6 + (0.0088237)*X2.X3.X10
+ (0.0028364)*X2.X3.X11 + (0.0040591)*X2.X4.X5 + (-0.0027629)*X2.X4.X6
+ (-0.0041669)*X2.X4.X10 + (0.00016448)*X2.X4.X11 + (-0.0011513)*X2.X5.X6
+ (0.010474)*X2.X5.X10 + (-0.0027042)*X2.X5.X11 + (-0.0068691)*X2.X6.X10
+ (-0.0052539)*X2.X6.X11 + (-0.0014556)*X2.X10.X11 + (0.0041183)*X3.X4.X5
+ (-0.007534)*X3.X4.X6 + (-0.0018005)*X3.X4.X10 + (-0.017102)*X3.X4.X11
+ (-0.004172)*X3.X5.X6 + (-0.0098191)*X3.X5.X10 + (0.0021211)*X3.X5.X11
+ (-0.04285)*X3.X6.X10 + (0.0018929)*X3.X6.X11 + (-0.013287)*X3.X10.X11
+ (0.0053963)*X4.X5.X6 + (0.0073842)*X4.X5.X10 + (0.0085695)*X4.X5.X11
+ (0.057666)*X4.X6.X10 + (0.0090835)*X4.X6.X11 + (0.0013672)*X4.X10.X11
+ (0.035665)*X5.X6.X10 + (-0.0063469)*X5.X6.X11 + (-0.0076851)*X5.X10.X11
+ (-0.064241)*X6.X10.X11 + (0.0065545)*X3.X4.X4 + (0.0054179)*X3.X5.X5
+ (0.0086161)*X3.X6.X6 + (0.028424)*X3.X10.X10 + (0.002907)*X3.X11.X11
+ (-0.0017437)*X4.X3.X3 + (0.0021089)*X4.X5.X5 + (-0.0022186)*X4.X6.X6
+ (-0.0013204)*X4.X10.X10 + (0.00019194)*X4.X11.X11 + (0.0099019)*X5.X3.X3
+ (-0.002663)*X5.X4.X4 + (0.0049416)*X5.X6.X6 + (0.013161)*X5.X10.X10
+ (0.00027327)*X5.X11.X11 + (-0.0013009)*X6.X3.X3 + (-0.0012562)*X6.X4.X4
+ (-0.004259)*X6.X5.X5 + (0.022526)*X6.X10.X10 + (-0.012147)*X6.X11.X11
+ (0.020813)*X10.X3.X3 + (-0.0069111)*X10.X4.X4 + (-0.0067559)*X10.X5.X5
+ (-0.086867)*X10.X6.X6 + (-0.019376)*X10.X11.X11 + (-0.0016156)*X11.X3.X3
+ (0.0048524)*X11.X4.X4 + (0.00025459)*X11.X5.X5 + (-0.0082097)*X11.X6.X6
+ (-0.010851)*X11.X10.X10

(A13.8)

Nice

• Plan de Taguchi $L_{32}(2^{31})$

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & 1.9998 + (0.017347)*X_1 + (-0.014083)*X_2 \\ & + (-0.10443)*X_3 + (0.09965)*X_4 + (-0.045602)*X_5 + (0.13488)*X_6 + (0.0037068)*X_7 \\ & + (-0.017498)*X_8 + (0.042658)*X_9 + (1.9998)*X_{10} + (-0.19037)*X_{11} + (-0.0097572)*X_3.X_5 \\ & + (-0.014083)*X_3.X_4 + (-0.10443)*X_3.X_{10} + (0.13488)*X_{10}.X_6 + (0.042658)*X_{10}.X_9 \\ & + (-0.19037)*X_{10}.X_{11} + (-0.045602)*X_{10}.X_5 + (0.09965)*X_{10}.X_4 + (-0.023716)*X_{11}.X_5 \\ & + (-0.017498)*X_{11}.X_4 + (0.021038)*X_{11}.X_7 + (0.015276)*X_7.X_5 + (0.017347)*X_7.X_4 \\ & + (0.016731)*X_4.X_5 \end{aligned} \quad (A13.9)$$

• Plan de Taguchi $L_{64}(2^{63})$

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & 2.003 + (0.00026575)*X_1 + (-0.023007)*X_2 \\ & + (-0.076769)*X_3 + (0.10375)*X_4 + (-0.028267)*X_5 + (0.153)*X_6 + (-0.0009897)*X_7 \\ & + (-0.02206)*X_8 + (0.033258)*X_9 + (2.003)*X_{10} + (-0.16776)*X_{11} + (-0.076769)*X_3.X_{10} \\ & + (-0.022504)*X_3.X_6 + (-0.020075)*X_3.X_9 + (-0.018834)*X_3.X_{11} + (-0.0059325)*X_3.X_4 \\ & + (0.00026575)*X_3.X_2 + (-0.023007)*X_2.X_{10} + (-0.010234)*X_2.X_6 + (0.001614)*X_3.X_7 \\ & + (0.0054594)*X_2.X_{11} + (-0.0089119)*X_2.X_5 + (0.0011466)*X_2.X_4 + (0.010234)*X_4.X_7 \\ & + (0.10375)*X_4.X_{10} + (0.020075)*X_4.X_6 + (0.022504)*X_4.X_9 + (0.0065533)*X_4.X_{11} \\ & + (0.014393)*X_4.X_5 + (0.003181)*X_5.X_7 + (-0.028267)*X_5.X_{10} + (0.033771)*X_5.X_6 \\ & + (-0.0083632)*X_5.X_9 + (-0.013773)*X_5.X_{11} + (0.010702)*X_{11}.X_7 + (-0.16776)*X_{11}.X_{10} \\ & + (-0.032685)*X_{11}.X_6 + (0.019028)*X_{11}.X_9 + (0.033258)*X_9.X_{10} + (0.0059325)*X_9.X_6 \\ & + (-0.0066484)*X_9.X_8 + (-0.0011466)*X_6.X_7 + (0.153)*X_6.X_{10} + (-0.010702)*X_6.X_8 \\ & + (-0.0009897)*X_{10}.X_7 + (-0.02206)*X_3.X_5 \end{aligned} \quad (A13.10)$$

• Plan de Box-Behnken

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & 2.2819 + (-0.010096)*X_1 + (-0.018645)*X_2 \\ & + (-0.090029)*X_3 + (0.097796)*X_4 + (-0.036353)*X_5 + (0.14087)*X_6 + (-0.00068825)*X_7 \\ & + (-0.016256)*X_8 + (0.031057)*X_9 + (2.0949)*X_{10} + (-0.15117)*X_{11} + (-0.00085483)*X_1.X_2 \\ & + (-0.013665)*X_1.X_3 + (1.1976e-005)*X_1.X_4 + (0.0057911)*X_1.X_5 + (-0.012298)*X_1.X_6 \\ & + (0.00025583)*X_1.X_7 + (-0.0054895)*X_1.X_8 + (-0.0013685)*X_1.X_9 + (-0.0068981)*X_1.X_{10} \\ & + (-0.013845)*X_1.X_{11} + (-0.0028136)*X_2.X_3 + (0.0021672)*X_2.X_4 + (0.0090621)*X_2.X_5 \\ & + (-0.0054776)*X_2.X_6 + (-0.0046414)*X_2.X_7 + (-0.0024128)*X_2.X_8 + (-0.010938)*X_2.X_9 \\ & + (-0.016494)*X_2.X_{10} + (-0.0019676)*X_2.X_{11} + (0.015196)*X_3.X_4 + (-0.0031519)*X_3.X_5 \\ & + (-0.030941)*X_3.X_6 + (0.002171)*X_3.X_7 + (0.00087794)*X_3.X_8 + (0.0024349)*X_3.X_9 \\ & + (-0.079691)*X_3.X_{10} + (-0.023044)*X_3.X_{11} + (0.0030506)*X_4.X_5 + (0.023781)*X_4.X_6 \\ & + (-2.7311e-005)*X_4.X_7 + (0.0020238)*X_4.X_8 + (-0.011649)*X_4.X_9 + (0.092638)*X_4.X_{10} \\ & + (0.01363)*X_4.X_{11} + (0.03137)*X_5.X_6 + (0.0053648)*X_5.X_7 + (0.0057596)*X_5.X_8 \\ & + (-0.0011945)*X_5.X_9 + (-0.030775)*X_5.X_{10} + (-0.023916)*X_5.X_{11} + (-0.0070814)*X_6.X_7 \\ & + (-0.0070971)*X_6.X_8 + (0.0089304)*X_6.X_9 + (0.16113)*X_6.X_{10} + (-0.030121)*X_6.X_{11} \\ & + (-0.0061859)*X_7.X_8 + (0.0035382)*X_7.X_9 + (-0.00099314)*X_7.X_{10} + (0.00083567)*X_7.X_{11} \\ & + (0.0015171)*X_8.X_9 + (-0.015188)*X_8.X_{10} + (-0.0072731)*X_8.X_{11} + (0.03121)*X_9.X_{10} \\ & + (0.015781)*X_9.X_{11} + (-0.15866)*X_{10}.X_{11} + (0.0049425)*X_1^2 + (-0.0025936)*X_2^2 \\ & + (0.0055053)*X_3^2 + (-0.0068215)*X_4^2 + (0.003355)*X_5^2 + (-0.10404)*X_6^2 + (-0.0012258)*X_7^2 \\ & + (-0.0050952)*X_8^2 + (0.0067334)*X_9^2 + (-0.13015)*X_{10}^2 + (-0.043067)*X_{11}^2 \end{aligned} \quad (A13.11)$$

• Plan de couplage n^2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$

$$\begin{aligned} \text{Consommation auxiliaires (kWh/m}^2\text{.an)} = & 2.2861 + (-0.0092783)*X_1 + (-0.021315)*X_2 \\ & + (-0.099033)*X_3 + (0.094238)*X_4 + (-0.037092)*X_5 + (0.13322)*X_6 + (-0.0013086)*X_7 \\ & + (-0.013781)*X_8 + (0.032674)*X_9 + (2.1575)*X_{10} + (-0.14102)*X_{11} + (0.0019625)*X_1.X_2 \\ & + (0.00091845)*X_1.X_3 + (0.00035744)*X_1.X_4 + (-0.0011803)*X_1.X_5 + (-0.001532)*X_1.X_6 \\ & + (-0.0012565)*X_1.X_7 + (-0.0046635)*X_1.X_8 + (0.0033188)*X_1.X_9 + (-0.0055522)*X_1.X_{10} \\ & + (0.0042791)*X_1.X_{11} + (0.0024)*X_2.X_3 + (0.0033583)*X_2.X_4 + (-6.7091e-005)*X_2.X_5 \\ & + (-0.0089203)*X_2.X_6 + (0.001043)*X_2.X_7 + (-0.0025967)*X_2.X_8 + (-0.0072484)*X_2.X_9 \\ & + (-0.019388)*X_2.X_{10} + (-0.00076499)*X_2.X_{11} + (0.0032611)*X_3.X_4 + (-0.0071531)*X_3.X_5 \\ & + (-0.027849)*X_3.X_6 + (0.0038869)*X_3.X_7 + (0.0021615)*X_3.X_8 + (0.0021505)*X_3.X_9 \\ & + (-0.080969)*X_3.X_{10} + (-0.017238)*X_3.X_{11} + (0.0089139)*X_4.X_5 + (0.019149)*X_4.X_6 \\ & + (0.0027442)*X_4.X_7 + (0.0023954)*X_4.X_8 + (-0.0082975)*X_4.X_9 + (0.10161)*X_4.X_{10} \\ & + (0.010726)*X_4.X_{11} + (0.031099)*X_5.X_6 + (0.0032752)*X_5.X_7 + (0.0030915)*X_5.X_8 \\ & + (-0.0033393)*X_5.X_9 + (-0.033273)*X_5.X_{10} + (-0.018153)*X_5.X_{11} + (-0.0054827)*X_6.X_7 \\ & + (-0.0068197)*X_6.X_8 + (0.012182)*X_6.X_9 + (0.15565)*X_6.X_{10} + (-0.031591)*X_6.X_{11} \\ & + (-0.0018788)*X_7.X_8 + (0.0026571)*X_7.X_9 + (-0.0027931)*X_7.X_{10} + (0.0061271)*X_7.X_{11} \\ & + (-0.0047029)*X_8.X_9 + (-0.015614)*X_8.X_{10} + (-0.0040823)*X_8.X_{11} + (0.030035)*X_9.X_{10} \end{aligned} \quad (A13.12)$$

$$\begin{aligned}
 &+ (0.012556)*X9.X11 + (-0.16405)*X10.X11 + (0.0050024)*X3.X3 + (-0.0072726)*X4.X4 \\
 &+ (-0.10626)*X6.X6 + (-0.13158)*X10.X10 + (-0.042688)*X11.X11 + (0.00079858)*X2.X3.X4 \\
 &+ (0.0028558)*X2.X3.X5 + (0.00041783)*X2.X3.X6 + (-0.0018119)*X2.X3.X10 \\
 &+ (0.0017082)*X2.X3.X11 + (-0.00098968)*X2.X4.X5 + (0.0020828)*X2.X4.X6 \\
 &+ (0.0033361)*X2.X4.X10 + (-0.0013642)*X2.X4.X11 + (-0.0051561)*X2.X5.X6 \\
 &+ (0.0060216)*X2.X5.X10 + (0.0031966)*X2.X5.X11 + (-0.0067663)*X2.X6.X10 \\
 &+ (0.0024406)*X2.X6.X11 + (0.00022311)*X2.X10.X11 + (0.0068563)*X3.X4.X5 \\
 &+ (-0.0019231)*X3.X4.X6 + (0.003666)*X3.X4.X10 + (-0.012767)*X3.X4.X11 \\
 &+ (-0.0041581)*X3.X5.X6 + (-0.0065364)*X3.X5.X10 + (-0.0072281)*X3.X5.X11 \\
 &+ (-0.030676)*X3.X6.X10 + (0.0018461)*X3.X6.X11 + (-0.016736)*X3.X10.X11 \\
 &+ (0.00081149)*X4.X5.X6 + (0.011312)*X4.X5.X10 + (0.010248)*X4.X5.X11 \\
 &+ (0.025132)*X4.X6.X10 + (0.007113)*X4.X6.X11 + (0.0039541)*X4.X10.X11 \\
 &+ (0.033114)*X5.X6.X10 + (-0.003831)*X5.X6.X11 + (-0.016604)*X5.X10.X11 \\
 &+ (-0.032211)*X6.X10.X11 + (0.001384)*X3.X4.X4 + (0.0043467)*X3.X5.X5 \\
 &+ (-0.0076717)*X3.X6.X6 + (0.017127)*X3.X10.X10 + (0.006772)*X3.X11.X11 \\
 &+ (-0.0039686)*X4.X3.X3 + (0.0058691)*X4.X5.X5 + (0.012869)*X4.X6.X6 \\
 &+ (-0.0015873)*X4.X10.X10 + (-0.0063927)*X4.X11.X11 + (0.011409)*X5.X3.X3 \\
 &+ (-0.00085625)*X5.X4.X4 + (-0.0084198)*X5.X6.X6 + (0.0048297)*X5.X10.X10 \\
 &+ (-0.004376)*X5.X11.X11 + (-0.002616)*X6.X3.X3 + (0.0038895)*X6.X4.X4 \\
 &+ (-0.0071022)*X6.X5.X5 + (0.034027)*X6.X10.X10 + (-0.0091081)*X6.X11.X11 \\
 &+ (0.0062332)*X10.X3.X3 + (-0.004136)*X10.X4.X4 + (-0.0081537)*X10.X5.X5 \\
 &+ (-0.11953)*X10.X6.X6 + (-0.03168)*X10.X11.X11 + (0.0063621)*X11.X3.X3 \\
 &+ (0.0062756)*X11.X4.X4 + (-0.0055187)*X11.X5.X5 + (-0.02929)*X11.X6.X6 \\
 &+ (-0.0026867)*X11.X10.X10
 \end{aligned}$$

Annexe A14 : Modèles Polynômiaux pour l'évaluation des besoins de chauffage et de la consommation d'énergie finale annuelle avec la ventilation double flux

Nancy

- **Plan de couplage n°2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

Chauffage (kWh/m².an) = 55.0124 + (4.9082)*X1 + (5.4038)*X2 + (24.5761)*X3
+ (-3.2491)*X4 + (8.6733)*X5 + (-0.49279)*X6 + (1.3472)*X7 + (4.5412)*X8 + (-2.9536)*X9
+ (0.062677)*X1.X2 + (0.25601)*X1.X3 + (-0.079127)*X1.X4 + (-0.63019)*X1.X5
+ (0.12261)*X1.X6 + (-0.0020902)*X1.X7 + (0.06896)*X1.X8 + (-0.069448)*X1.X9
+ (0.42275)*X2.X3 + (-0.12623)*X2.X4 + (0.060389)*X2.X5 + (0.037989)*X2.X6
+ (0.036605)*X2.X7 + (0.031466)*X2.X8 + (-0.085634)*X2.X9 + (-0.62392)*X3.X4
+ (4.979)*X3.X5 + (0.15342)*X3.X6 + (0.16026)*X3.X7 + (0.28884)*X3.X8 + (-0.28372)*X3.X9
+ (-0.49947)*X4.X5 + (-0.37795)*X4.X6 + (0.14951)*X4.X7 + (-0.093495)*X4.X8
+ (0.14644)*X4.X9 + (-0.42781)*X5.X6 + (0.17375)*X5.X7 + (0.056992)*X5.X8
+ (0.00046738)*X5.X9 + (0.2331)*X6.X7 + (0.073149)*X6.X8 + (-0.17259)*X6.X9
+ (0.015296)*X7.X8 + (-0.05731)*X7.X9 + (-0.071155)*X8.X9 + (-0.13574)*X1.X1
+ (0.0079214)*X2.X2 + (-0.5904)*X3.X3 + (0.18308)*X4.X4 + (0.11898)*X5.X5 + (1.4749)*X6.X6
+ (0.2272)*X7.X7 + (0.43939)*X8.X8 + (0.042983)*X9.X9 + (-0.064403)*X1.X2.X3
+ (-0.0038185)*X1.X2.X4 + (-0.01623)*X1.X2.X5 + (0.052594)*X1.X2.X6 + (0.040498)*X1.X2.X7
+ (0.034972)*X1.X2.X8 + (-0.055637)*X1.X2.X9 + (0.087231)*X1.X3.X4 + (-0.028456)*X1.X3.X5
+ (0.0069126)*X1.X3.X6 + (0.018625)*X1.X3.X7 + (-0.055077)*X1.X3.X8
+ (-0.0047276)*X1.X3.X9 + (0.048814)*X1.X4.X5 + (-0.0039599)*X1.X4.X6
+ (0.0058172)*X1.X4.X7 + (0.033711)*X1.X4.X8 + (0.003358)*X1.X4.X9 + (-0.01322)*X1.X5.X6
+ (0.010754)*X1.X5.X7 + (-0.083116)*X1.X5.X8 + (-0.037325)*X1.X5.X9 + (-0.010491)*X1.X6.X7
+ (-0.030364)*X1.X6.X8 + (0.0013468)*X1.X6.X9 + (-0.02572)*X1.X7.X8 + (0.03359)*X1.X7.X9
+ (0.037615)*X1.X8.X9 + (0.013349)*X2.X3.X4 + (0.022843)*X2.X3.X5 + (0.010733)*X2.X3.X6
+ (0.041429)*X2.X3.X7 + (-0.062353)*X2.X3.X8 + (0.018015)*X2.X3.X9 + (-0.044059)*X2.X4.X5
+ (-0.015445)*X2.X4.X6 + (0.0011157)*X2.X4.X7 + (0.005693)*X2.X4.X8 + (0.021263)*X2.X4.X9
+ (0.040631)*X2.X5.X6 + (0.063004)*X2.X5.X7 + (-0.020078)*X2.X5.X8 + (-0.020192)*X2.X5.X9
+ (0.014695)*X2.X6.X7 + (0.0027865)*X2.X6.X8 + (0.008238)*X2.X6.X9 + (0.010292)*X2.X7.X8
+ (0.1134)*X2.X7.X9 + (0.060367)*X2.X8.X9 + (-0.11229)*X3.X4.X5 + (-0.032741)*X3.X4.X6
+ (-0.00024337)*X3.X4.X7 + (0.036749)*X3.X4.X8 + (-0.024395)*X3.X4.X9
+ (-0.028849)*X3.X5.X6 + (0.023393)*X3.X5.X7 + (0.021437)*X3.X5.X8 + (-0.066317)*X3.X5.X9
+ (-0.018996)*X3.X6.X7 + (0.006319)*X3.X6.X8 + (0.023947)*X3.X6.X9 + (-0.0097127)*X3.X7.X8
+ (0.090894)*X3.X7.X9 + (0.019181)*X3.X8.X9 + (-0.063897)*X4.X5.X6 + (0.019264)*X4.X5.X7
+ (0.031172)*X4.X5.X8 + (0.020111)*X4.X5.X9 + (0.048549)*X4.X6.X7 + (0.0032569)*X4.X6.X8
+ (-0.0083773)*X4.X6.X9 + (0.0044043)*X4.X7.X8 + (0.040048)*X4.X7.X9
+ (-0.016673)*X4.X8.X9 + (0.050504)*X5.X6.X7 + (-0.026672)*X5.X6.X8
+ (-0.0041368)*X5.X6.X9 + (0.011033)*X5.X7.X8 + (0.030064)*X5.X7.X9 + (0.047381)*X5.X8.X9
+ (0.018409)*X6.X7.X8 + (-0.0097808)*X6.X7.X9 + (-0.045022)*X6.X8.X9 + (0.024728)*X7.X8.X9

(A14.1)

- **Plan de couplage : Composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

Energie (kWh/m².an) = 57.5386 + (2.6382)*X1 + (2.9221)*X2 + (9.0864)*X3 + (-0.67279)*X4
+ (3.429)*X5 + (-1.1542)*X6 + (0.88819)*X7 + (2.6808)*X8 + (4.0634)*X9 + (0.063065)*X10
+ (-1.4894)*X11 + (-12.5563)*X12 + (-0.28245)*X13 + (0.089886)*X1.X2 + (0.30304)*X1.X3
+ (-0.10282)*X1.X4 + (-0.54755)*X1.X5 + (-0.010604)*X1.X6 + (-0.11522)*X1.X7
+ (0.018922)*X1.X8 + (-0.021697)*X1.X9 + (0.1346)*X1.X10 + (0.15905)*X1.X11
+ (-1.8681)*X1.X12 + (0.1694)*X1.X13 + (0.18052)*X2.X3 + (-0.21425)*X2.X4
+ (-0.049388)*X2.X5 + (-0.071461)*X2.X6 + (0.17834)*X2.X7 + (-0.050306)*X2.X8
+ (-0.066702)*X2.X9 + (0.085919)*X2.X10 + (-0.0012778)*X2.X11 + (-2.1082)*X2.X12
+ (0.15572)*X2.X13 + (-0.63959)*X3.X4 + (0.69122)*X3.X5 + (0.078623)*X3.X6
+ (0.015792)*X3.X7 + (0.13626)*X3.X8 + (-0.24623)*X3.X9 + (0.27564)*X3.X10 +
(0.2798)*X3.X11 + (-9.2992)*X3.X12 + (0.42189)*X3.X13 + (-0.12705)*X4.X5 + (-0.60712)*X4.X6
+ (0.25007)*X4.X7 + (-0.0062707)*X4.X8 + (0.026822)*X4.X9 + (-0.068339)*X4.X10

(A14.2)

+ (-0.35054)*X4.X11 + (1.19)*X4.X12 + (-0.54813)*X4.X13 + (-0.46514)*X5.X6
+ (0.032435)*X5.X7 + (0.091339)*X5.X8 + (-0.065265)*X5.X9 + (-0.042688)*X5.X10
+ (-0.34643)*X5.X11 + (-3.2828)*X5.X12 + (-0.29492)*X5.X13 + (-0.18386)*X6.X7
+ (-0.063121)*X6.X8 + (-0.15812)*X6.X9 + (0.05146)*X6.X10 + (0.40241)*X6.X11
+ (0.31745)*X6.X12 + (1.0457)*X6.X13 + (-0.13474)*X7.X8 + (0.14752)*X7.X9
+ (-0.063447)*X7.X10 + (0.052273)*X7.X11 + (-0.5054)*X7.X12 + (-0.056133)*X7.X13
+ (-0.19997)*X8.X9 + (-0.049292)*X8.X10 + (0.11875)*X8.X11 + (-1.7066)*X8.X12
+ (-0.10748)*X8.X13 + (0.054066)*X9.X10 + (-0.012239)*X9.X11 + (1.1591)*X9.X12
+ (-0.020407)*X9.X13 + (0.16818)*X10.X11 + (0.078587)*X10.X12 + (0.54702)*X10.X13
+ (-0.027541)*X11.X12 + (0.77324)*X11.X13 + (-0.03005)*X12.X13 + (-0.068846)*X3.X3
+ (1.4504)*X6.X6 + (0.52266)*X10.X10 + (0.075651)*X11.X11 + (7.8813)*X12.X12
+ (0.72048)*X13.X13 + (-7.8165)*X12.X12.X12 + (-1.0959)*X13.X13.X13
+ (4.8133)*X12.X12.X12 + (-0.032929)*X13.X13.X13 + (0.2503)*X3.X5.X6
+ (-1.7911)*X3.X5.X12 + (-0.024308)*X3.X5.X13 + (-0.092671)*X3.X6.X12
+ (-0.47969)*X3.X6.X13 + (0.1219)*X3.X12.X13 + (0.25017)*X5.X6.X12 + (0.1862)*X5.X6.X13
+ (0.23748)*X5.X12.X13 + (-0.039839)*X6.X12.X13 + (0.3418)*X3.X5.X5 + (-0.20963)*X3.X6.X6
+ (5.6431)*X3.X12.X12 + (-0.44597)*X3.X13.X13 + (0.42538)*X5.X3.X3 + (0.016285)*X5.X6.X6
+ (2.0863)*X5.X12.X12 + (0.11471)*X5.X13.X13 + (-0.56781)*X6.X3.X3 + (0.70296)*X6.X5.X5
+ (-0.1294)*X6.X12.X12 + (-0.72796)*X6.X13.X13 + (0.09136)*X12.X3.X3
+ (-0.26094)*X12.X5.X5 + (-0.82334)*X12.X6.X6 + (-0.033375)*X12.X13.X13
+ (-0.34219)*X13.X3.X3 + (-0.043764)*X13.X5.X5 + (-0.28514)*X13.X6.X6
+ (0.19018)*X13.X12.X12 + (-0.017522)*X3.X5.X6.X6 + (2.2972)*X3.X5.X12.X12
+ (0.19325)*X3.X6.X12.X12 + (-0.22319)*X5.X6.X12.X12

Agen

- **Plan de couplage n°2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

Chauffage (kWh/m².an) = 28.2091 + (3.0198)*X1 + (3.2902)*X2 + (15.0976)*X3
+ (-2.6515)*X4 + (5.2034)*X5 + (-1.4977)*X6 + (1.3382)*X7 + (2.0633)*X8 + (-2.0511)*X9
+ (0.064001)*X1.X2 + (0.29456)*X1.X3 + (-0.095897)*X1.X4 + (-0.36549)*X1.X5
+ (0.060196)*X1.X6 + (0.0034848)*X1.X7 + (0.061866)*X1.X8 + (-0.06561)*X1.X9
+ (0.42796)*X2.X3 + (-0.13368)*X2.X4 + (0.042169)*X2.X5 + (-0.02437)*X2.X6
+ (0.037042)*X2.X7 + (0.030258)*X2.X8 + (-0.086537)*X2.X9 + (-0.71274)*X3.X4
+ (3.1148)*X3.X5 + (0.070247)*X3.X6 + (0.20043)*X3.X7 + (0.24227)*X3.X8 + (-0.34091)*X3.X9
+ (-0.42881)*X4.X5 + (-0.41323)*X4.X6 + (0.10491)*X4.X7 + (-0.081133)*X4.X8
+ (0.18456)*X4.X9 + (-0.46442)*X5.X6 + (0.148)*X5.X7 + (0.029996)*X5.X8 + (-0.011678)*X5.X9
+ (0.32291)*X6.X7 + (-0.016699)*X6.X8 + (-0.17921)*X6.X9 + (0.007183)*X7.X8
+ (-0.084706)*X7.X9 + (-0.060055)*X8.X9 + (-0.075659)*X1.X1 + (0.014814)*X2.X2
+ (-0.082706)*X3.X3 + (0.20445)*X4.X4 + (0.12002)*X5.X5 + (1.3338)*X6.X6 + (0.023264)*X7.X7
+ (0.2145)*X8.X8 + (0.055465)*X9.X9 + (-0.086873)*X1.X2.X3 + (0.016425)*X1.X2.X4
+ (-0.025221)*X1.X2.X5 + (0.070698)*X1.X2.X6 + (0.0034184)*X1.X2.X7 + (0.054066)*X1.X2.X8
+ (-0.037059)*X1.X2.X9 + (0.096926)*X1.X3.X4 + (-0.042936)*X1.X3.X5 + (0.057962)*X1.X3.X6
+ (0.02266)*X1.X3.X7 + (-0.060903)*X1.X3.X8 + (0.045221)*X1.X3.X9 + (0.016282)*X1.X4.X5
+ (-0.016256)*X1.X4.X6 + (0.04146)*X1.X4.X7 + (0.056268)*X1.X4.X8 + (0.034044)*X1.X4.X9
+ (0.0029238)*X1.X5.X6 + (-0.0040457)*X1.X5.X7 + (-0.12159)*X1.X5.X8
+ (-0.0033916)*X1.X5.X9 + (-0.0053534)*X1.X6.X7 + (-0.004781)*X1.X6.X8
+ (-0.0025808)*X1.X6.X9 + (-0.018918)*X1.X7.X8 + (0.032507)*X1.X7.X9 + (0.044518)*X1.X8.X9
+ (0.010449)*X2.X3.X4 + (0.022902)*X2.X3.X5 + (0.063142)*X2.X3.X6 + (0.04652)*X2.X3.X7
+ (-0.056461)*X2.X3.X8 + (0.006727)*X2.X3.X9 + (-0.059513)*X2.X4.X5 + (-0.011277)*X2.X4.X6
+ (-0.0087707)*X2.X4.X7 + (0.0271)*X2.X4.X8 + (0.033214)*X2.X4.X9 + (0.034274)*X2.X5.X6
+ (0.040764)*X2.X5.X7 + (-0.05275)*X2.X5.X8 + (-0.020729)*X2.X5.X9 + (0.010852)*X2.X6.X7
+ (0.0077516)*X2.X6.X8 + (0.024437)*X2.X6.X9 + (0.02196)*X2.X7.X8 + (0.079834)*X2.X7.X9
+ (0.036256)*X2.X8.X9 + (-0.12227)*X3.X4.X5 + (-0.15627)*X3.X4.X6 + (0.0094237)*X3.X4.X7
+ (0.033592)*X3.X4.X8 + (-0.002242)*X3.X4.X9 + (-0.012689)*X3.X5.X6 + (0.027032)*X3.X5.X7
+ (0.018409)*X3.X5.X8 + (-0.048047)*X3.X5.X9 + (-0.012028)*X3.X6.X7 + (0.061152)*X3.X6.X8
+ (-0.018762)*X3.X6.X9 + (-0.011824)*X3.X7.X8 + (0.037178)*X3.X7.X9 + (0.026805)*X3.X8.X9
+ (-0.082589)*X4.X5.X6 + (0.014903)*X4.X5.X7 + (0.021932)*X4.X5.X8 + (0.0087372)*X4.X5.X9
+ (0.04561)*X4.X6.X7 + (-0.01357)*X4.X6.X8 + (-0.0091129)*X4.X6.X9 + (0.0031096)*X4.X7.X8
+ (0.042801)*X4.X7.X9 + (-0.014986)*X4.X8.X9 + (0.055351)*X5.X6.X7 + (-0.029661)*X5.X6.X8
+ (0.00049819)*X5.X6.X9 + (-0.0024847)*X5.X7.X8 + (0.029894)*X5.X7.X9
+ (0.0086893)*X5.X8.X9 + (0.016365)*X6.X7.X8 + (-0.010319)*X6.X7.X9 + (-0.07206)*X6.X8.X9
+ (0.034113)*X7.X8.X9

(A14.3)

• **Plan de couplage : Composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

$$\begin{aligned} \text{Energie (kWh/m}^2\text{.an)} = & 48.324 + (1.4755)*X_1 + (1.5632)*X_2 + (5.1975)*X_3 + (0.32899)*X_4 \\ & + (2.1319)*X_5 + (-2.461)*X_6 + (0.89248)*X_7 + (1.1854)*X_8 + (4.7652)*X_9 + (-0.10536)*X_{10} \\ & + (-2.7333)*X_{11} + (-6.5557)*X_{12} + (-0.90443)*X_{13} + (0.2185)*X_1.X_2 + (0.33279)*X_1.X_3 \\ & + (-0.19432)*X_1.X_4 + (-0.45391)*X_1.X_5 + (-0.10009)*X_1.X_6 + (-0.063985)*X_1.X_7 \\ & + (0.10641)*X_1.X_8 + (-0.03155)*X_1.X_9 + (0.17747)*X_1.X_{10} + (0.1926)*X_1.X_{11} \\ & + (-1.2286)*X_1.X_{12} + (0.16197)*X_1.X_{13} + (0.17419)*X_2.X_3 + (-0.10926)*X_2.X_4 \\ & + (-0.083996)*X_2.X_5 + (-0.057677)*X_2.X_6 + (0.26058)*X_2.X_7 + (-0.01117)*X_2.X_8 \\ & + (-0.038909)*X_2.X_9 + (0.12039)*X_2.X_{10} + (0.041614)*X_2.X_{11} + (-1.3663)*X_2.X_{12} \\ & + (0.22765)*X_2.X_{13} + (-0.65572)*X_3.X_4 + (0.24014)*X_3.X_5 + (0.041239)*X_3.X_6 \\ & + (-0.0062686)*X_3.X_7 + (0.12688)*X_3.X_8 + (-0.31293)*X_3.X_9 + (0.37982)*X_3.X_{10} \\ & + (0.32627)*X_3.X_{11} + (-5.8302)*X_3.X_{12} + (0.66376)*X_3.X_{13} + (-0.03396)*X_4.X_5 + (-0.724)*X_4.X_6 \\ & + (0.27228)*X_4.X_7 + (-0.024872)*X_4.X_8 + (0.042812)*X_4.X_9 + (-0.11247)*X_4.X_{10} \\ & + (-0.64216)*X_4.X_{11} + (0.93511)*X_4.X_{12} + (-1.0497)*X_4.X_{13} + (-0.84856)*X_5.X_6 \\ & + (0.044304)*X_5.X_7 + (0.038595)*X_5.X_8 + (-0.12697)*X_5.X_9 + (-0.14979)*X_5.X_{10} \\ & + (-0.54759)*X_5.X_{11} + (-2.0065)*X_5.X_{12} + (-0.54012)*X_5.X_{13} + (-0.20257)*X_6.X_7 \\ & + (-0.12753)*X_6.X_8 + (-0.14488)*X_6.X_9 + (-0.1598)*X_6.X_{10} + (0.6047)*X_6.X_{11} \\ & + (0.72737)*X_6.X_{12} + (1.5179)*X_6.X_{13} + (-0.15752)*X_7.X_8 + (0.1043)*X_7.X_9 \\ & + (-0.058622)*X_7.X_{10} + (-0.036969)*X_7.X_{11} + (-0.38953)*X_7.X_{12} + (-0.083228)*X_7.X_{13} \\ & + (-0.081347)*X_8.X_9 + (-0.012504)*X_8.X_{10} + (0.030427)*X_8.X_{11} + (-0.78716)*X_8.X_{12} \\ & + (-0.18131)*X_8.X_{13} + (0.010175)*X_9.X_{10} + (-0.034005)*X_9.X_{11} + (0.82289)*X_9.X_{12} \\ & + (-0.13866)*X_9.X_{13} + (0.38233)*X_{10}.X_{11} + (0.06008)*X_{10}.X_{12} + (1.0343)*X_{10}.X_{13} \\ & + (-0.066953)*X_{11}.X_{12} + (1.5303)*X_{11}.X_{13} + (-0.054936)*X_{12}.X_{13} + (0.34494)*X_3.X_3 \\ & + (1.5486)*X_6.X_6 + (1.0216)*X_{10}.X_{10} + (0.30733)*X_{11}.X_{11} + (-12.8157)*X_{12}.X_{12} \\ & + (-16.0178)*X_{13}.X_{13} + (-3.6923)*X_{12}.X_{12}.X_{12} + (-1.5904)*X_{13}.X_{13}.X_{13} \\ & + (19.3471)*X_{12}.X_{12}.X_{12}.X_{12} + (17.3315)*X_{13}.X_{13}.X_{13}.X_{13} + (0.27993)*X_3.X_5.X_6 \\ & + (-1.0609)*X_3.X_5.X_{12} + (0.14111)*X_3.X_5.X_{13} + (0.030766)*X_3.X_6.X_{12} + (-0.42321)*X_3.X_6.X_{13} \\ & + (0.23255)*X_3.X_{12}.X_{13} + (0.28328)*X_5.X_6.X_{12} + (0.22372)*X_5.X_6.X_{13} + (0.35487)*X_5.X_{12}.X_{13} \\ & + (-0.049134)*X_6.X_{12}.X_{13} + (0.16965)*X_3.X_5.X_5 + (-0.43866)*X_3.X_6.X_6 + (3.6533)*X_3.X_{12}.X_{12} \\ & + (-0.46773)*X_3.X_{13}.X_{13} + (0.4033)*X_5.X_3.X_3 + (0.25712)*X_5.X_6.X_6 + (1.4949)*X_5.X_{12}.X_{12} \\ & + (-0.025165)*X_5.X_{13}.X_{13} + (-0.23243)*X_6.X_3.X_3 + (0.47006)*X_6.X_5.X_5 \\ & + (-0.29292)*X_6.X_{12}.X_{12} + (-0.7458)*X_6.X_{13}.X_{13} + (0.0067502)*X_{12}.X_3.X_3 \\ & + (-0.37427)*X_{12}.X_5.X_5 + (-0.81036)*X_{12}.X_6.X_6 + (-0.037937)*X_{12}.X_{13}.X_{13} \\ & + (-0.22178)*X_{13}.X_3.X_3 + (-0.19932)*X_{13}.X_5.X_5 \\ & + (-0.46848)*X_{13}.X_6.X_6 + (0.04518)*X_{13}.X_{12}.X_{12} + (-0.04101)*X_3.X_5.X_6.X_6 \\ & + (1.6236)*X_3.X_5.X_{12}.X_{12} + (0.12415)*X_3.X_6.X_{12}.X_{12} + (0.008361)*X_5.X_6.X_{12}.X_{12} \end{aligned} \quad (A14.4)$$

Nice

• **Plan de couplage n°2 : plan de Box-Behnken + composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

$$\begin{aligned} \text{Chauffage (kWh/m}^2\text{.an)} = & 12.5592 + (1.5948)*X_1 + (1.6631)*X_2 + (8.0271)*X_3 + (-1.9757)*X_4 \\ & + (2.5828)*X_5 + (-1.6402)*X_6 + (1.474)*X_7 + (2.0048)*X_8 + (-1.2709)*X_9 + (0.044057)*X_1.X_2 \\ & + (0.25345)*X_1.X_3 + (-0.11297)*X_1.X_4 + (-0.15656)*X_1.X_5 + (-0.0045814)*X_1.X_6 \\ & + (0.038915)*X_1.X_7 + (0.079754)*X_1.X_8 + (-0.066312)*X_1.X_9 + (0.32387)*X_2.X_3 \\ & + (-0.13149)*X_2.X_4 + (0.054799)*X_2.X_5 + (-0.022316)*X_2.X_6 + (0.075809)*X_2.X_7 \\ & + (0.054846)*X_2.X_8 + (-0.070814)*X_2.X_9 + (-0.6181)*X_3.X_4 + (1.6927)*X_3.X_5 + (0.1197)*X_3.X_6 \\ & + (0.34562)*X_3.X_7 + (0.32213)*X_3.X_8 + (-0.31414)*X_3.X_9 + (-0.34705)*X_4.X_5 + (-0.4068)*X_4.X_6 \\ & + (0.026202)*X_4.X_7 + (-0.14952)*X_4.X_8 + (0.18598)*X_4.X_9 + (-0.4442)*X_5.X_6 + (0.16259)*X_5.X_7 \\ & + (0.049219)*X_5.X_8 + (-0.014828)*X_5.X_9 + (0.41245)*X_6.X_7 + (-0.0014632)*X_6.X_8 \\ & + (-0.14238)*X_6.X_9 + (0.091357)*X_7.X_8 + (-0.12822)*X_7.X_9 + (-0.11333)*X_8.X_9 \\ & + (-0.041849)*X_1.X_1 + (0.0080559)*X_2.X_2 + (0.18312)*X_3.X_3 + (0.17865)*X_4.X_4 \\ & + (0.1028)*X_5.X_5 + (1.2148)*X_6.X_6 + (0.073765)*X_7.X_7 + (0.23449)*X_8.X_8 + (0.058394)*X_9.X_9 \\ & + (-0.069595)*X_1.X_2.X_3 + (0.036794)*X_1.X_2.X_4 + (-0.028141)*X_1.X_2.X_5 + (0.064289)*X_1.X_2.X_6 \\ & + (0.0085813)*X_1.X_2.X_7 + (0.050061)*X_1.X_2.X_8 + (-0.025924)*X_1.X_2.X_9 + (0.091242)*X_1.X_3.X_4 \\ & + (-0.056001)*X_1.X_3.X_5 + (0.064292)*X_1.X_3.X_6 + (0.010441)*X_1.X_3.X_7 + (-0.098637)*X_1.X_3.X_8 \\ & + (-0.022721)*X_1.X_3.X_9 + (0.026778)*X_1.X_4.X_5 + (-0.031806)*X_1.X_4.X_6 + (0.069168)*X_1.X_4.X_7 \\ & + (0.063633)*X_1.X_4.X_8 + (0.010265)*X_1.X_4.X_9 + (0.0012308)*X_1.X_5.X_6 + (-0.023757)*X_1.X_5.X_7 \\ & + (-0.1003)*X_1.X_5.X_8 + (0.0032873)*X_1.X_5.X_9 + (-0.0071438)*X_1.X_6.X_7 + (0.0024969)*X_1.X_6.X_8 \\ & + (-0.014208)*X_1.X_6.X_9 + (-0.04389)*X_1.X_7.X_8 + (0.040376)*X_1.X_7.X_9 + (0.030243)*X_1.X_8.X_9 \\ & + (0.016526)*X_2.X_3.X_4 + (-0.00056063)*X_2.X_3.X_5 + (0.065536)*X_2.X_3.X_6 \\ & + (-0.0036479)*X_2.X_3.X_7 + (-0.064989)*X_2.X_3.X_8 + (-0.029411)*X_2.X_3.X_9 \\ & + (-0.045889)*X_2.X_4.X_5 + (-0.04043)*X_2.X_4.X_6 + (-0.01373)*X_2.X_4.X_7 + (0.014824)*X_2.X_4.X_8 \end{aligned} \quad (A14.5)$$

+ (0.027269)*X2.X4.X9 + (0.047955)*X2.X5.X6 + (0.015712)*X2.X5.X7 + (-0.070232)*X2.X5.X8
+ (0.002714)*X2.X5.X9 + (0.017066)*X2.X6.X7 + (0.0076485)*X2.X6.X8 + (0.0031304)*X2.X6.X9
+ (0.038006)*X2.X7.X8 + (0.094125)*X2.X7.X9 + (0.036799)*X2.X8.X9 + (-0.11162)*X3.X4.X5
+ (-0.17091)*X3.X4.X6 + (0.047111)*X3.X4.X7 + (0.068636)*X3.X4.X8 + (0.017126)*X3.X4.X9
+ (-0.0083271)*X3.X5.X6 + (0.036598)*X3.X5.X7 + (0.0076656)*X3.X5.X8
+ (-0.029954)*X3.X5.X9 + (0.039989)*X3.X6.X7 + (0.098354)*X3.X6.X8 + (-0.045314)*X3.X6.X9
+ (-0.05)*X3.X7.X8 + (0.1047)*X3.X7.X9 + (0.025032)*X3.X8.X9 + (-0.090984)*X4.X5.X6
+ (0.020901)*X4.X5.X7 + (0.018811)*X4.X5.X8 + (0.045928)*X4.X5.X9 + (0.019301)*X4.X6.X7
+ (-0.048208)*X4.X6.X8 + (0.031717)*X4.X6.X9 + (0.033871)*X4.X7.X8 + (0.011602)*X4.X7.X9
+ (-0.028475)*X4.X8.X9 + (0.068139)*X5.X6.X7 + (-0.024578)*X5.X6.X8
+ (-0.0025215)*X5.X6.X9 + (0.021877)*X5.X7.X8 + (0.057615)*X5.X7.X9 + (-0.020567)*X5.X8.X9
+ (0.046736)*X6.X7.X8 + (-0.017706)*X6.X7.X9 + (-0.083292)*X6.X8.X9 + (0.056724)*X7.X8.X9

• **Plan de couplage : Composite $L_{64}(2^{63})$ + Taguchi $L_{32}(2^{31})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$ + Taguchi $L_{81}(3^{40})$**

Energie (kWh/m².an) = 45.9016 + (0.58421)*X1 + (0.69303)*X2 + (2.3962)*X3 + (1.5907)*X4
+ (1.2586)*X5 + (-3.1345)*X6 + (0.84547)*X7 + (1.0274)*X8 + (5.4472)*X9 + (0.12511)*X10
+ (-4.4937)*X11 + (-2.9651)*X12 + (-2.8248)*X13 + (0.14686)*X1.X2 + (0.40508)*X1.X3
+ (-0.20992)*X1.X4 + (-0.36084)*X1.X5 + (-0.13836)*X1.X6 + (-0.014997)*X1.X7
+ (0.16127)*X1.X8 + (-0.064443)*X1.X9 + (0.16218)*X1.X10 + (0.14152)*X1.X11
+ (-0.66272)*X1.X12 + (0.075129)*X1.X13 + (0.032131)*X2.X3 + (-0.077218)*X2.X4
+ (-0.12469)*X2.X5 + (-0.063899)*X2.X6 + (0.34394)*X2.X7 + (0.059591)*X2.X8
+ (-0.031257)*X2.X9 + (0.059954)*X2.X10 + (-0.019914)*X2.X11 + (-0.64543)*X2.X12
+ (0.14559)*X2.X13 + (-0.45344)*X3.X4 + (-0.12312)*X3.X5 + (0.11281)*X3.X6
+ (0.16079)*X3.X7 + (0.27621)*X3.X8 + (-0.33316)*X3.X9 + (0.40739)*X3.X10
+ (0.52376)*X3.X11 + (-3.078)*X3.X12 + (0.80535)*X3.X13 + (0.24675)*X4.X5
+ (-0.62031)*X4.X6 + (0.18359)*X4.X7 + (-0.049544)*X4.X8 + (-0.0022569)*X4.X9
+ (-0.075728)*X4.X10 + (-1.0298)*X4.X11 + (0.76133)*X4.X12 + (-1.7108)*X4.X13
+ (-0.72453)*X5.X6 + (-0.0090622)*X5.X7 + (-0.022623)*X5.X8 + (-0.24486)*X5.X9
+ (-0.10762)*X5.X10 + (-0.9783)*X5.X11 + (-1.0442)*X5.X12 + (-1.0181)*X5.X13
+ (-0.28268)*X6.X7 + (-0.14814)*X6.X8 + (-0.060775)*X6.X9 + (-0.35248)*X6.X10
+ (0.59822)*X6.X11 + (0.75707)*X6.X12 + (1.6532)*X6.X13 + (-0.17425)*X7.X8
+ (-0.049329)*X7.X9 + (0.050379)*X7.X10 + (0.13236)*X7.X11 + (-0.43555)*X7.X12
+ (-0.034577)*X7.X13 + (-0.24606)*X8.X9 + (0.092854)*X8.X10 + (0.12834)*X8.X11
+ (-0.80452)*X8.X12 + (-0.1877)*X8.X13 + (0.10052)*X9.X10 + (-0.10298)*X9.X11
+ (0.47726)*X9.X12 + (-0.36101)*X9.X13 + (0.41082)*X10.X11 + (0.094545)*X10.X12
+ (1.2459)*X10.X13 + (0.030652)*X11.X12 + (2.6758)*X11.X13 + (0.012594)*X12.X13
+ (0.4274)*X3.X3 + (1.3128)*X6.X6 + (0.79122)*X10.X10 + (0.40008)*X11.X11
+ (-15.0474)*X12.X12 + (-14.9666)*X13.X13 + (-1.3645)*X12.X12.X12 + (-2.8958)*X13.X13.X13
+ (18.286)*X12.X12.X12.X12 + (18.5451)*X13.X13.X13.X13 + (0.29121)*X3.X5.X6
+ (-0.60475)*X3.X5.X12 + (0.30455)*X3.X5.X13 + (0.042995)*X3.X6.X12 + (-0.36519)*X3.X6.X13
+ (0.14042)*X3.X12.X13 + (0.40621)*X5.X6.X12 + (0.2817)*X5.X6.X13 + (0.38742)*X5.X12.X13
+ (-0.21741)*X6.X12.X13 + (0.20653)*X3.X5.X5 + (-0.73194)*X3.X6.X6 + (2.1654)*X3.X12.X12
+ (-0.61077)*X3.X13.X13 + (0.4518)*X5.X3.X3 + (0.46506)*X5.X6.X6 + (0.84403)*X5.X12.X12
+ (0.17921)*X5.X13.X13 + (-0.068132)*X6.X3.X3 + (0.26942)*X6.X5.X5 + (-0.24358)*X6.X12.X12
+ (-0.55987)*X6.X13.X13 + (-0.10551)*X12.X3.X3 + (-0.42905)*X12.X5.X5
+ (-0.86996)*X12.X6.X6 + (0.0060617)*X12.X13.X13 + (-0.22615)*X13.X3.X3
+ (-0.16649)*X13.X5.X5 + (-0.39435)*X13.X6.X6 + (0.015841)*X13.X12.X12
+ (-0.0089703)*X3.X5.X6.X6 + (1.0583)*X3.X5.X12.X12 + (-0.019956)*X3.X6.X12.X12
+ (-0.078489)*X5.X6.X12.X12

(A14.6)

