

# Table des matières

---

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>IX</b>
<b>NOMENCLATURE :.....</b>	<b>X</b>
LETTRES .....	X
FONCTIONS.....	XIII
ACRONYMES .....	XIV
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1. CADRE CONTEXTUEL.....</b>	<b>4</b>
1.1    HABITAT : ROLES ET DEFIS .....	4
1.2    L'HABITAT TYPIQUEMENT MALAGASY .....	5
1.3    BESOIN DE LA GESTION DES INCERTITUDES .....	7
1.4    L'HABITAT TYPE .....	7
1.5    CONCLUSION .....	10
<b>CHAPITRE 2. MISE EN EVIDENCE DE LA VARIABILITE DE L'AMBIANCE A L'INTERIEUR DU BATIMENT TYPE .....</b>	<b>11</b>
2.1    METHODOLOGIE.....	11
2.1.1 <i>Modélisation de l'ambiance dans un bâtiment</i> .....	11
2.1.1.1    Les données nécessaires à la simulation .....	12
a.    Les paramètres de simulation.....	13
b.    La localisation .....	13
c.    La construction - les matériaux .....	14
d.    Zone thermique Géométrie / Description.....	15
2.1.1.2    Modélisation du bâtiment typiquement Malagasy .....	15
a.    La construction.....	16
1.    Toits / planchers/ dalles/plafonds.....	16
2.    Portes.....	17
3.    Les ouvertures.....	18
2.1.1.3    EnergyPlus :.....	19
a.    Prise en compte des conditions climatiques .....	19
b.    Prise en compte des dispositions constructives.....	20
2.1.2 <i>Modélisation du confort thermique</i> .....	20
2.1.2.1    Les modèles quantitatifs .....	20
a.    Les processus d'échange de chaleur du corps .....	21
1.    Modèle de Fanger.....	22

2.	Modèle de Pierce .....	23
b.	Mesures de confort .....	23
1.	Les indices empiriques .....	23
2.	Les indices analytiques .....	24
2.1.2.2	Les modèles qualitatifs .....	25
a.	Zone de confort .....	27
b.	Zone de contrôle potentiel pour les périodes froides .....	28
c.	Zones de contrôle potentiel pour les périodes chaudes : .....	28
1.	Zone d'effet de masse .....	28
2.	Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne .....	29
3.	Zone de ventilation naturelle-mouvement d'air sur la surface de peau .....	29
4.	Zone de refroidissement évaporatif direct .....	30
5.	Zone de refroidissement évaporatif indirect .....	30
2.1.2.3	Données météorologiques de référence .....	30
1.	Fichier source .....	30
2.	Périodes de simulation .....	32
2.2	VARIABILITE DE L'AMBIANCE .....	33
2.2.1	Démarche méthodologique .....	33
2.2.2	Diagramme bioclimatique d'Antananarivo .....	34
2.2.3	Dynamique de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment .....	36
2.2.3.1	Température intérieure .....	36
2.2.3.2	Humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment .....	37
2.2.4	Variabilité du confort hygrothermique .....	38
2.2.4.1	Confort d'été .....	38
2.2.4.2	Confort d'hiver .....	39
2.3	CONCLUSION .....	41

## **CHAPITRE 3. IDENTIFICATION DES PARAMETRES RESPONSABLES DE LA VARIABILITE DE L'AMBIANCE A L'INTERIEUR DU BATIMENT TYPE ..... 43**

3.1	METHODOLOGIE .....	43
3.1.1	Analyse de sensibilité .....	43
3.1.1.1	Analyse de sensibilité globale .....	44
a.	Décomposition de Sobol et indices de sensibilité .....	44
b.	Estimation des indices de sensibilité : .....	48
1.	Méthode de Sobol .....	48
2.	La méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) [47] .....	51
3.1.1.2	Métamodèle et analyse de sensibilité .....	54
a.	PCE ( <i>Polynomials Chaos Expansion</i> ) .....	55
1.	Les polynômes unidimensionnels et les paramètres .....	56
2.	Détermination des coefficients de PC .....	59
b.	Indices de sensibilité (paramètres indépendants) .....	60
c.	Indices de sensibilité pour des paramètres dépendants .....	61

3.1.1.3 Synthèse de la méthode.....	63
<b>3.1.2 Les données météorologiques .....</b>	<b>63</b>
3.1.2.1 Approche utilisée pour l'échantillonnage des données météorologiques .....	63
a. Echantillonnage des sollicitations .....	65
1. Méthode de Monté Carlo .....	65
2. Latin Hypercube Sampling [66].....	66
b. Induction des corrélations et/ou des auto-corrélations dans les échantillons [67] .....	67
3.1.2.2 Application de la méthode aux données météorologiques .....	69
a. Conditions de création des données météorologiques .....	69
b. Les caractéristiques statistiques des données.....	70
1. Distributions de chaque paramètre.....	70
2. L'auto-corrélation de chaque paramètre .....	70
3. La corrélation entre les paramètres .....	73
c. Création des échantillons.....	74
3.1.2.3 Vérification des échantillons.....	79
a. La corrélation entre les paramètres.....	79
b. L'auto-corrélation de chaque paramètre.....	81
c. Couverture de l'espace .....	82
3.1.3 Estimation des influences de la variabilité des données météorologiques sur le confort hygrothermique .....	84
3.1.3.1 Démarche méthodologique.....	84
3.1.3.2 Influences générales des paramètres.....	86
a. Semaine typique de la saison chaude .....	86
b. Semaine typique de la saison froide .....	87
3.1.3.3 Dynamique des indices de sensibilité.....	90
a. Contributions marginales .....	90
b. Contribution de chaque paramètre sans leur contribution en corrélation avec les autres paramètres 94	
c. Contributions totales.....	98
1. Semaine typique de la saison froide.....	101
3.2 CONCLUSION .....	104
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>105</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>109</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>116</b>
ANNEXE 1 : INPUT DATA FILE DU BATIMENT TYPE .....	117
ANNEXE 2 : DONNEES METEOROLOGIQUES DE REFERENCE .....	122

# Liste des figures

---

Figure 1. Répartition de l'énergie consommée par secteur.....	4
Figure 2. Contribution des différentes sources dans la fourniture d'Energie en 2011 .....	5
Figure 3. Une habitation typique des côtes malgaches .....	6
Figure 4. Une habitation rurale typique des hautes terres malgaches.....	6
Figure 5. Une habitation urbaine typique des hautes terres malgaches .....	6
Figure 6. Vue en perspective de l'habitat type .....	8
Figure 7. Face Nord de l'habitation type .....	8
Figure 8. Face Sud de l'habitation type.....	9
Figure 9. Face Est de l'habitation type .....	9
Figure 10. Face Ouest de l'habitation type .....	9
Figure 11. Hiérarchie et besoin d'EnergyPlus .....	19
Figure 12. Introduction des données météorologiques dans EnergyPlus .....	19
Figure 13. Introduction et création du fichier IDF dans EnergyPlus .....	20
Figure 14. Diagramme psychrométrique .....	26
Figure 15. Démarche méthodologique pour la mise en évidence de la dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type .....	33
Figure 16. Diagramme bioclimatique de la région d'Antananarivo .....	34
Figure 17. Variabilité de la température intérieure (été et hiver) .....	36
Figure 18. Variabilité de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment type (été et hiver). .....	37
Figure 19. Dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type (été) .....	38
Figure 20. Dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type (hiver) .....	39
Figure 21. Fonction d'auto-corrélation de la température des semaines typiques des 2 saisons .....	71
Figure 22. Fonction d'auto-corrélation de l'humidité relative de l'air des semaines typiques des 2 saisons .....	71
Figure 23. Fonction d'auto-corrélation du rayonnement direct des semaines typiques des 2 saisons .....	72
Figure 24. Fonction d'auto-corrélation du rayonnement diffus des semaines typiques des 2 saisons .....	72
Figure 25. Fonction d'auto-corrélation de la direction du vent des semaines typiques des 2 saisons .....	72
Figure 26. Fonction d'auto-corrélation de la vitesse du vent des semaines typiques des 2 saisons .....	73

Figure 27. Allure générale des 20 échantillons créés et celle du signal source (semaine typique de la saison chaude) .....	77
Figure 28. Allure générale des 20 échantillons créés et celle du signal source (semaine typique de la saison froide) .....	78
Figure 29. Matrice de corrélation entre les paramètres sous forme boxplot (semaine typique de la saison chaude) .....	80
Figure 30. Matrice de corrélation entre les paramètres sous forme boxplot (semaine typique de la saison froide) .....	80
Figure 31. Evolution de la corrélation entre la température et l'humidité durant le processus de création des données météorologiques (semaine typique de la saison chaude) .....	81
Figure 32. Evolution de la corrélation entre la température et l'humidité durant le processus de création des données météorologiques (semaine typique de la saison froide) .....	82
Figure 33. Couverture de l'espace Température-Humidité (semaine typique de la saison chaude) .....	83
Figure 34. Couverture de l'espace Température-Humidité (semaine typique de la saison froide) .....	83
Figure 35. Démarche méthodologique pour la caractérisation et création de la variabilité des données météorologiques .....	84
Figure 36. Démarche méthodologique pour l'expansion des données météorologiques sur le modèle .....	85
Figure 37. Estimation des influences de la variabilité des données météorologiques sur le confort hygrothermique .....	85
Figure 38. Indices de sensibilité générales (été) .....	86
Figure 39. Indices de sensibilité générales (hiver) .....	87
Figure 40. Contributions en corrélation avec les autres paramètres de chaque paramètre (été) .....	88
Figure 41. Contributions en corrélation avec les autres paramètres de chaque paramètre (hiver) .....	89
Figure 42. Dynamique de la contribution marginale de la température de l'air extérieur (été) .....	90
Figure 43. Dynamique de la contribution marginale de l'humidité de l'air extérieur (été) .....	90
Figure 44. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement direct (été) .....	91
Figure 45. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement diffus (été) .....	91
Figure 46. Dynamique de la contribution marginale de la direction du vent (été) .....	91
Figure 47. Dynamique de la contribution marginale de la vitesse du vent (été) .....	92

Figure 48. Dynamique de la contribution marginale de la température de l'air extérieure (hiver).....	92
Figure 49. Dynamique de la contribution marginale de l'humidité relative de l'air extérieure (hiver).....	92
Figure 50. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement direct (hiver).....	93
Figure 51. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement diffus (hiver).....	93
Figure 52. Dynamique de la contribution marginale de la direction du vent (hiver) .....	93
Figure 53. Dynamique de la contribution marginale de la vitesse du vent (hiver) .....	94
Figure 54. Dynamique de la contribution de la température de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été) .....	94
Figure 55. Dynamique de la contribution de l'humidité relative de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été) .....	95
Figure 56. Dynamique de la contribution du rayonnement direct sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été).....	95
Figure 57. Dynamique de la contribution du rayonnement diffus sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été).....	95
Figure 58. Dynamique de la contribution de la vitesse du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été).....	96
Figure 59. Dynamique de la contribution de la direction du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été).....	96
Figure 60. Dynamique de la contribution de la température de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver).....	96
Figure 61. Dynamique de la contribution de l'humidité relative de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver).....	97
Figure 62. Dynamique de la contribution du rayonnement direct sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver) .....	97
Figure 63. Dynamique de la contribution du rayonnement diffus sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver) .....	97
Figure 64. Dynamique de la contribution de la vitesse du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver) .....	98
Figure 65. Dynamique de la contribution de la direction du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver) .....	98
Figure 66. Dynamique de la contribution totale de la température de l'air extérieure (été) .....	99
Figure 67. Dynamique de la contribution totale de l'humidité relative de l'air extérieure (été) .....	99
Figure 68. Dynamique de la contribution totale du rayonnement direct (été) .....	99
Figure 69. Dynamique de la contribution totale du rayonnement diffus(été) .....	100

<b>Figure 70. Dynamique de la contribution totale de la vitesse du vent (été) .....</b>	<b>100</b>
<b>Figure 71. Dynamique de la contribution totale de direction du vent (été) .....</b>	<b>100</b>
<b>Figure 72. Dynamique de la contribution totale de la température de l'air extérieur (hiver) .....</b>	<b>101</b>
<b>Figure 73. Dynamique de la contribution totale de l'humidité relative de l'air extérieure (hiver) .....</b>	<b>101</b>
<b>Figure 74. Dynamique de la contribution totale du rayonnement direct (hiver) .....</b>	<b>101</b>
<b>Figure 75. Dynamique de la contribution totale du rayonnement diffus(hiver) .....</b>	<b>102</b>
<b>Figure 76. Dynamique de la contribution totale de la vitesse du vent(hiver) .....</b>	<b>102</b>
<b>Figure 77. Dynamique de la contribution totale de la direction du vent(hiver) .....</b>	<b>102</b>
<b>Figure 78. Dynamique des sommes des contributions en corrélation et sans la corrélation (été) .....</b>	<b>103</b>
<b>Figure 79. Dynamique des sommes des contributions en corrélation et sans la corrélation (hiver) .....</b>	<b>104</b>

# Liste des tableaux

---

<b>Tableau 2-1. Correspondance entre le type de terrain et sa description .....</b>	<b>13</b>
<b>Tableau 2-2- Propriétés générales et propriétés de surface des murs .....</b>	<b>16</b>
<b>Tableau 2-3- Propriétés générales et celles de surface du toit, du plancher et du plafond... 17</b>	<b>17</b>
<b>Tableau 2-4- Propriétés générales et celles de surface des portes .....</b>	<b>17</b>
<b>Tableau 2-5. Valeurs extrêmes et écart de la température à l'intérieur du bâtiment type (été) .....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau 2-6. Valeurs extrêmes et écart de la température à l'intérieur du bâtiment type (hiver).....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau 2-7.Valeurs extrêmes et écart de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment type (été).....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau 2-8.Valeurs extrêmes et écart de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment type (hiver) .....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau 3-1. Correspondance entre famille de loi de probabilité et polynôme orthogonal. 56</b>	<b>56</b>
<b>Tableau 3-2. Matrice de corrélation de six variables d'entrée pour la semaine typique de la saison chaude .....</b>	<b>74</b>
<b>Tableau 3-3. Matrice de corrélation de six variables d'entrée pour la semaine typique de la saison froide .....</b>	<b>74</b>



# Nomenclature :

---

## Lettres

---

	<u>Signification</u>	<u>Unité</u>
$A$ :	Matrice d'auto-covariance	[–]
$A_{hn}$ :	Humidité absolue du point de neutralité	$\left[\frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'airsec}}\right]$
$a_i$ :	Scores	[–]
$a_j$ :	Coefficients du polynôme de chaos	[–]
$\alpha$ :	Degré du polynôme unidimensionnel	[–]
$\beta_3$ :	Moment d'ordre 3	[–]
$\beta_4$ :	Moment d'ordre 4	[–]
$C$ :	Matrice de corrélation	[–]
$C_{peau}$ :	Flux de chaleur sensible échangée par convection à la surface de peau	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$\varepsilon$ :	Erreur	[–]
$E_{res}$ :	Flux de chaleur échangée par évaporation respiratoire	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$E_{sk}$ :	Flux de chaleur échangée par évaporation	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$H_i$ :	Densité de probabilité marginale de chaque paramètre	[–]
$H_v$ :	Moyenne journalière totale d'irradiations solaires	$\left[\frac{Wh}{m^2}\right]$

$M$ :	Taux de métabolisme	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$\mu$ :	Moyenne de chaque variable	$[-]$
$P$ :	Matrice triangulaire inférieur (chol(C))	$[-]$
$\Phi$ :	Polynôme multivariable	$[-]$
$\phi$ :	Polynôme unidimensionnel	$[-]$
$P_{sat}$ :	Pression de saturation de l'air	$[hPa]$
$\Psi^{-1}$ :	Fonction de distribution inverse de la normale	$[-]$
$Q_{res}$ :	Flux de chaleur échangée par voie respiratoire	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$Q_{sk}$ :	Flux de chaleur échangée à la surface cutanée	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$R$ :	Matrice des scores	$[-]$
$\rho$ :	Coefficients de corrélation	$[-]$
$R_{peau}$ :	Flux de chaleur échangée sensible échangée par conduction à la surface de la peau	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$S$ :	Taux de chaleur stockée à l'intérieur de l'organisme	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$S_{cr}$ :	Taux de chaleur stockée à l'intérieur de la peau	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$\sigma$ :	Ecart type	$[-]$
$S_{ijk}$ :	Indice sensibilité	$[-]$
$S_{sk}$ :	Taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$T_m$ :	Température moyenne annuelle	[C]
$t_m$ :	Température moyenne mensuelle	[C]
$T_n$ :	Température neutre	[C]
$U$ :	Vecteur des variables décorrélées	[-]
$W$ :	Travail externe	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$X$ :	Vecteur des entrées	[-]
$X_s$ :	Variables centrées réduites	[-]
$x_{sat}$ :	Humidité absolue de l'air saturé	$\left[\frac{kg\ d'eau}{kg\ d'airsec}\right]$
$Y$ :	Vecteur de la sortie	[-]
$Z$ :	Vecteur des variables renormalisées	[-]

## Fonctions

---

$f(.)$ :	Modèle
$(.)^T$ :	Transpose
$V(.)$ :	Variance
$E(.)$ :	Espérance
$(.)^{-1}$ :	Inverse

## Acronymes

---

ANOVA	ANalysis Of VARIance
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers
EPW	EnergyPlus Weather Data
FAST	Fourier Amplitude Sensitivity Test
GMT	Greenwich Meridian Time
IDF	Input Data File
IWEC	International Weather Energy Calculation
LHS	Latin Hypercube Sampling
NCDC	Centre National des Données Climatiques
PC	Polynôme de Chaos
PMV	Predicted Mean Vote
SNL	Sandia National Laboratory
TMY	Typical Meteorological Year
TRY	Test Reference Year



# Introduction générale

---

La modélisation des phénomènes physiques et environnementaux s'est énormément développée, ceci grâce au progrès remarquable des connaissances et développement en informatique. Elle consiste en la représentation du phénomène étudié sous forme d'équations mathématiques dont la qualité découle particulièrement de la connaissance du phénomène à représenter. Ces modèles sont utilisés pour des simulations lorsque les expériences sur site ou en laboratoire sont relativement coûteuses. En thermique du bâtiment, de nombreux modèles dynamiques simulant le comportement de celui-ci ont été développés. Ces modèles sont utilisés pour analyser ou améliorer les performances énergétiques des bâtiments que ce soit en phase de conception ou de réhabilitation [1].

La modélisation des phénomènes naturels ou des procédés humains, en général, et des phénomènes physiques, en particulier, est toujours entachée d'incertitude. La fiabilité des résultats fournis par le modèle dépend de la structure du modèle, et aussi, de la justesse et de la représentativité des paramètres utilisés. Nous nous intéressons dans cette thèse aux incertitudes dues aux variables d'entrée du modèle quoiqu'elles soient liées à la structure du modèle. En thermique de l'habitat, les paramètres d'entrée sont catégorisés en deux groupes : les variables statiques ou les paramètres qui ne varient pas pendant la simulation comme les paramètres thermo-physiques des matériaux et les variables dynamiques ou les sollicitations qui varient pendant la simulation comme les charges internes et les variables météorologiques. Les incertitudes observées sur les résultats des simulations sont dans la grande partie expliquées par les paramètres dynamiques [2].

L'analyse de sensibilité permet de quantifier les influences de la variabilité des paramètres d'entrée sur la variabilité de la sortie du modèle. Elle est un outil d'aide à la décision puissante concernant l'orientation des efforts de recherche et de développement, ou encore à la justification en terme de sûreté de dimensionnement ou de modification d'un système. En thermique du bâtiment, l'analyse de sensibilité a été utilisée pour valider des logiciels de calcul thermo-aéraulique du bâtiment [1], déterminer les facteurs critiques de fiabilité des prédictions et de problème de calibration des modèles [3]; pour évaluer l'impact de la variabilité des données

météorologiques sur une maison basse consommation [4], ... . Dans ce travail, nous nous intéressons à l'application de l'analyse de sensibilité en thermique de l'habitat afin d'évaluer l'influence de la variabilité des données météorologiques sur le confort hygrothermique d'un bâtiment.

Effectivement, la prise en compte de l'impact de la variabilité des données météorologiques sur le confort hygrothermique peut se faire à l'aide d'une analyse de sensibilité. Cependant, l'application de l'analyse de sensibilité à un modèle décrivant la performance thermique d'un bâtiment avec les paramètres météorologiques présente deux difficultés majeures :

- Pour des modèles relativement simples, les indices de sensibilité sont calculés de façon analytique. Dans le cas des modèles complexes ou de type boîte noire comme dans la plupart des cas en thermique de l'habitat, ces indices sont estimés. Toutefois, cette méthode est coûteuse en nombre de simulations ainsi en temps de calcul. Pour remédier à ce problème, l'approximation du modèle en un métamodèle ou sa représentation construite à partir d'un nombre réduit de simulations du modèle réel est utilisée. De plus, les indices de sensibilité sont uniques et faciles à interpréter lorsque les entrées sont indépendantes. Toutefois, si les entrées sont dépendantes, les indices calculés à partir des méthodes d'analyse de sensibilité classique pourraient induire à des conclusions erronées. En effet, un paramètre peut être influent seulement à cause de sa corrélation avec d'autres paramètres. Or, les paramètres météorologiques sont fortement inter-corrélés.
- Afin de pouvoir faire une analyse de sensibilité à un modèle décrivant la performance thermique d'un bâtiment avec les sollicitations, nous devons avoir une quantité assez élevée de données météorologiques. La création de données météorologiques cohérentes avec le climat du site est alors indispensable. Ces données créées doivent permettre la propagation des incertitudes des paramètres dans le modèle et la caractérisation de la variabilité que ces incertitudes ont induites dans la sortie du modèle.

La pertinence des méthodes de modélisation demande le développement d'approches performantes pour mieux appréhender le comportement des modèles par rapport aux incertitudes des paramètres.



Cette thèse a pour objectifs de :

- Mettre en évidence la variabilité du confort hygrothermique dans un bâtiment à travers la modélisation du bâtiment et de son confort hygrothermique.
- Étudier l'influence de variabilité des sollicitations telles que les données météorologiques sur le confort hygrothermique à l'aide d'une analyse de sensibilité, ceci en développant une méthode d'analyse de sensibilité qui prend en compte non seulement la variabilité des données météorologiques mais aussi la corrélation entre ces données et en proposant une approche pour générer des données météorologiques correspondant au site d'implantation.

Afin d'atteindre lesdits objectifs, nous structurons notre mémoire de thèse en trois chapitres, autres les introduction et conclusion générales.

- Ainsi, le premier chapitre est consacré à la description du cadre contextuel de l'étude, en particulier, l'habitat type pris lors de la modélisation.
- Dans le deuxième chapitre, nous mettons en évidence la dispersion de l'ambiance à l'intérieur d'un habitat typique des hautes terres malgaches.
- Et le troisième chapitre développe les simulations grâce auxquelles nous identifions les paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment

Nous terminons notre rapport par les annexes nécessaires à la compréhension de notre étude plus précisément le programme indiquant l'entrée de données et les données de référence lors de nos simulations.

## Chapitre 1. Cadre contextuel

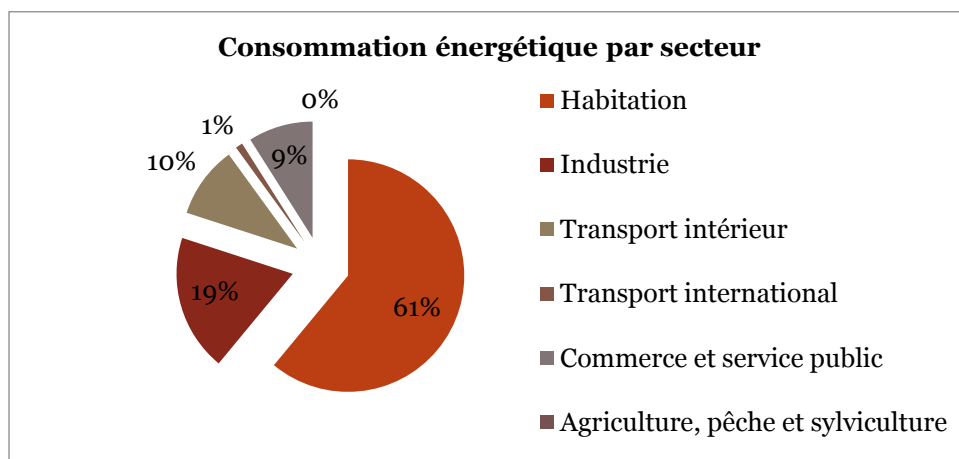
Ce chapitre a pour objectif d'exposer l'importance de la gestion des sources d'incertitude au maintien d'une ambiance confortable à l'intérieur d'un bâtiment typique des hautes terres malgaches. Pour cela, les rôles et les défis qu'un habitat doit tenir compte sont étalés. Une présentation des différents types d'habitation malgache est ensuite effectuée. Puis, nous procédons, d'abord, à la mise en exergue de l'importance de la gestion des sources d'incertitude au maintien d'une ambiance intérieure constante puis à la présentation de l'outil nécessaire pour gérer ces sources d'incertitude. Enfin, nous présentons l'habitat type qui est utilisé dans notre étude.

### 1.1 Habitat : rôles et défis

Un bâtiment pouvant être un logement ou un bureau ou un centre commercial ou un bâtiment industriel etc. sert à abriter ses occupants. De ce fait, un bâtiment doit assurer leur confort en toute saison tout en favorisant une atmosphère qui satisfait à l'hygiène et à la santé des occupants et la pérennité des équipements, entre autres.

Comme tout système énergétique, le bâtiment doit permettre l'amélioration de l'efficacité de la consommation d'énergie, comme :

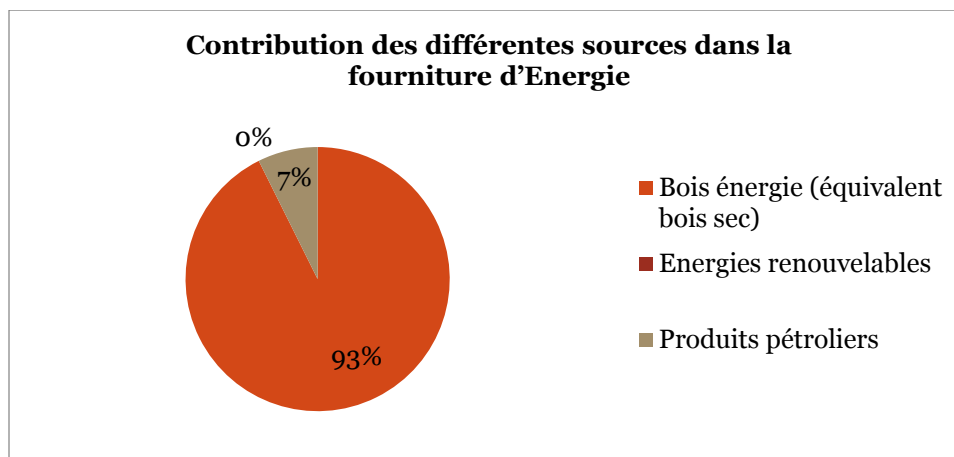
La réduction des factures énergétiques des usagers : à Madagascar, le secteur du bâtiment détient une part importante vis à vis de la consommation énergétique comme l'indique la Figure 1.



Source Ministère de l'Energie et des Mines 2001

Figure 1. Répartition de l'énergie consommée par secteur

- La conservation des ressources naturelles énergétiques : 90% de la consommation des ménages proviennent de la production et de la transformation du bois. Pourtant, l'exploitation abusive et désordonnée, ainsi irrationnelle de nos ressources forestières fragilise gravement l'environnement du pays (voir Figure 2).



Source AIDES 2012

Figure 2. Contribution des différentes sources dans la fourniture d'Énergie en 2011

## 1.2 L'habitat typiquement malagasy

À Madagascar, les habitations peuvent être classées en trois groupes comme le montrent les figures 3, 4 et 5 :

- Les habitations des côtes,
- Les habitations rurales des hautes terres,
- Les habitations urbaines des hautes terres.

Actuellement, les malgaches construisent suivant leurs contraintes financières. De ce fait, les bâtiments ne tiennent pas compte du confort des occupants.

Une variabilité de l'ambiance à l'intérieur des habitations est ainsi constatée.

Dans le but de créer et de maintenir des conditions d'ambiance intérieure confortable, les industriels ont mis au point des appareils électromécaniques et électroniques tels que les machines thermiques, climatiseurs... . Ce modèle d'architecture qui confie à la seule technique le soin de créer dans les bâtiments un microclimat artificiel par les installations des chauffage et climatisation ne tient pas

compte des particularités du climat du site, des bâtiments et entraîne ainsi des fortes consommations d'énergie essentiellement fossile, épuisable et polluante [5].



**Figure 3. Une habitation typique des côtes malgaches**



**Figure 4. Une habitation rurale typique des hautes terres malgaches**



**Figure 5. Une habitation urbaine typique des hautes terres malgaches**

La préoccupation mondiale vis-à-vis des problèmes liés à l'économie d'énergie et à l'environnement incite les chercheurs à développer des nouveaux concepts. Ces nouvelles idées consistent à favoriser des solutions dites passives ou bioclimatiques afin de générer et de maîtriser les conditions de confort estivales et hivernales.

### 1.3 Besoin de la gestion des incertitudes

---

Pour les deux solutions proposées précédemment c'est-à-dire l'utilisation des appareils électromécaniques et électroniques et le développement des solutions passives, les concepteurs cherchent seulement à les optimiser. Dans une approche d'étude et d'optimisation globale du bâtiment, il est préférable de maximiser l'exploration de l'espace des réponses du bâtiment.

Cette exploration implique le contrôle des réponses du bâtiment et pour ce faire, il est indispensable de procéder à des essais. Généralement, il existe deux façons de réaliser ces essais, soit sur site soit en laboratoire. Mais comme les essais sur site, les essais en laboratoire posent de problèmes pratiques : reproductibilité, durée et coûts des essais,...

La simulation numérique largement utilisée dans d'autres domaines des sciences physiques, en général, et de transferts thermique, aéraulique et hydrique, en particulier, offre une alternative intéressante aux essais, ou tout au moins un moyen complémentaire d'investigation qui est intéressant grâce à sa souplesse et à sa rapidité.

Après l'obtention des différentes réponses du bâtiment en fonction des différentes valeurs des sollicitations, la gestion des incertitudes peut être effectuée en appliquant une méthode d'analyse de sensibilité adéquate.

### 1.4 L'habitat type

---

Le bâtiment étudié est une habitation urbaine typique des hautes terres. De ce fait, les murs sont faits à partir des briques en terre cuite et recouverts d'enduit intérieurement et extérieurement.

Sa superficie est de 7m x 10m soit 70m<sup>2</sup>.

Il comprend cinq (5) zones thermiques qui sont :

- Séjour & cuisine,
- Chambre1,
- Chambre2,
- Salle de bain (SDB),
- Comble.

Le bâtiment n'est ni chauffé ni climatisé activement. Par conséquent, il ne possède aucun système de ventilation mécanique et la ventilation naturelle est ainsi non contrôlée. Son architecture est détaillée à travers les figures 6 à 10.

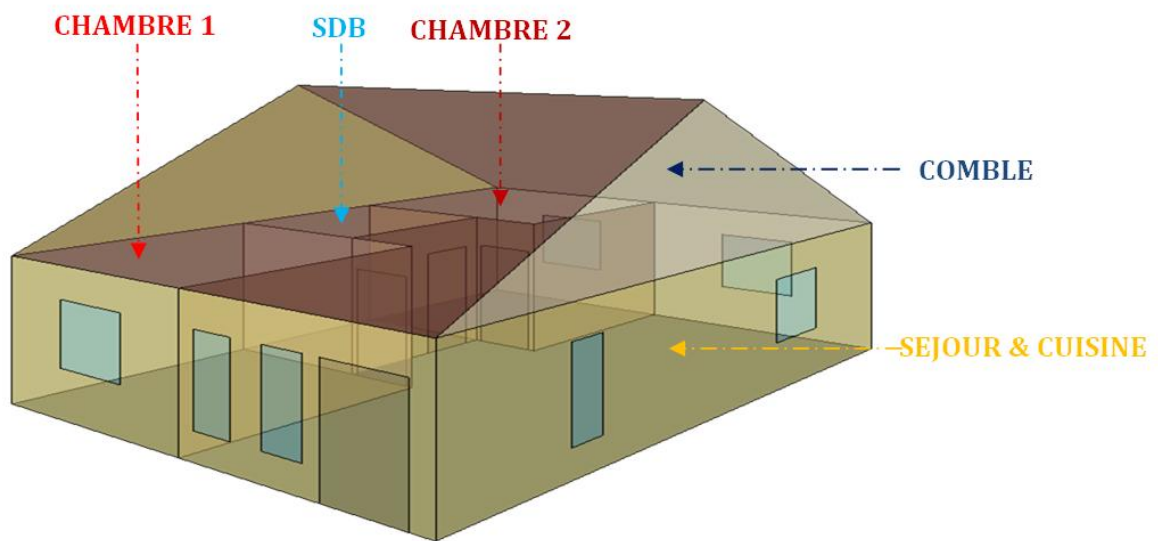


Figure 6. Vue en perspective de l'habitat type

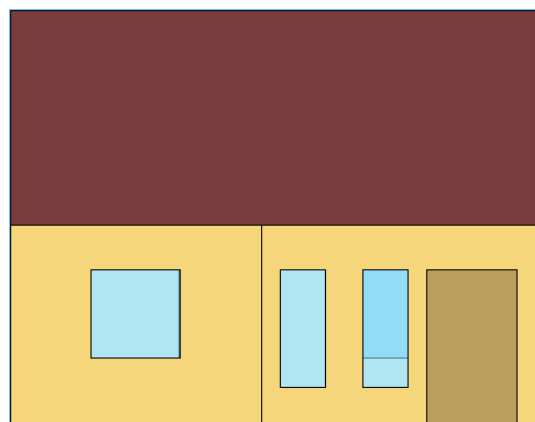
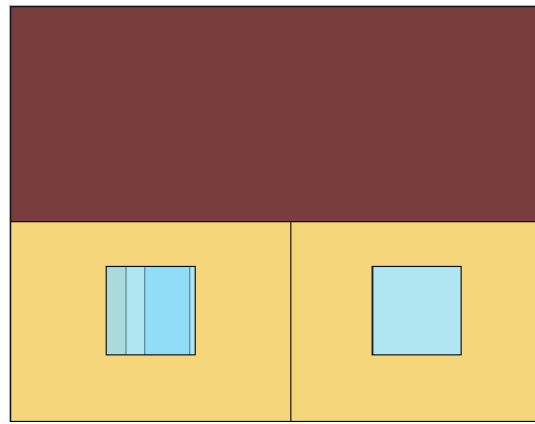
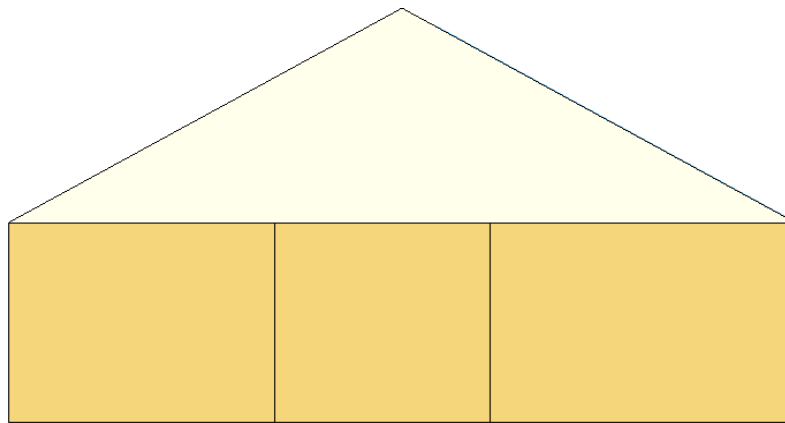


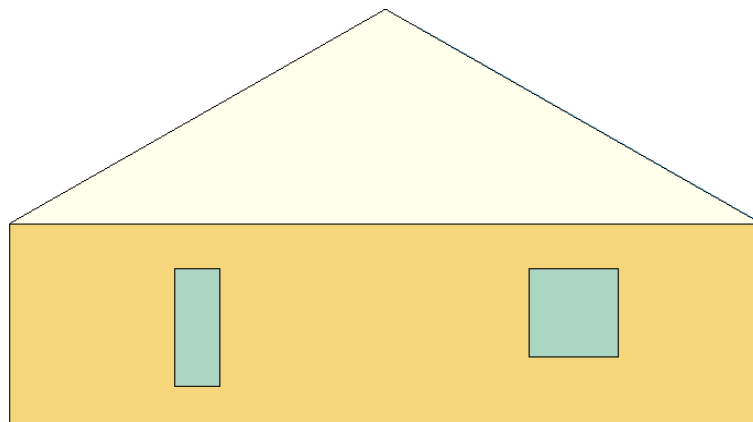
Figure 7. Face Nord de l'habitation type



**Figure 8. Face Sud de l'habitation type**



**Figure 9. Face Est de l'habitation type**



**Figure 10. Face Ouest de l'habitation type**

## 1.5 Conclusion

---

Un bâtiment doit assurer le confort de ses occupants en toute saison tout en favorisant une atmosphère qui satisfait à leur hygiène et à leur santé et à la pérennité de ses équipements. Comme tout système énergétique, il doit permettre aussi l'amélioration de l'efficacité de la consommation d'énergie. À Madagascar, les habitations peuvent être classées en trois groupes : les habitations des côtes, les habitations rurales des hautes terres et les habitations urbaines des hautes terres. Une variabilité de l'ambiance à l'intérieur de ces habitations est constatée. La gestion de cette variabilité de l'ambiance intérieure peut se faire en maximisant l'exploration de l'espace des réponses du bâtiment, celle-ci étant effectuée à l'aide des simulations numériques.



## Chapitre 2. Mise en évidence de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type

---

Le but de ce chapitre est la mise en évidence de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment typique des hautes terres malgaches. Pour cela, la modélisation de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type est réalisée en utilisant un moteur de calcul simulant le comportement thermique du bâtiment. La modélisation du confort hygrothermique est ensuite effectuée et ceci, en présentant l'état de l'art concernant les modèles quantitatifs et qualitatifs du confort. Enfin, la mise en évidence de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type est effectuée.

### 2.1 Méthodologie

---

#### 2.1.1 Modélisation de l'ambiance dans un bâtiment

---

La modélisation de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment nécessite la compréhension des phénomènes physiques définissant le comportement thermique du bâtiment à travers :

- les conditions climatiques, comme :
  - l'ensoleillement,
  - la température de l'air,
  - l'hygrométrie,
  - l'orientation et la fréquence des vents dominants.
- les dispositions constructives qui sont :
  - l'orientation,
  - les masques,
  - les matériaux,
  - les isolants,
  - la volumétrie.

- les équipements techniques tels que :
  - les systèmes de production et de distribution de chaleur et de froid,
  - la régulation,
  - le système de ventilation.
- les apports internes comme la chaleur produite par les occupants et par les équipements divers.

Dans cette thèse, les équipements techniques et les apports internes ne sont pas considérés.

L'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment peut être ainsi évaluée à partir des trois mécanismes d'échange thermique :

- La conduction : la chaleur se propage par agitation moléculaire dans le matériau (solide, liquide, gazeux) sans aucun mouvement de la matière dans son ensemble.
- La convection : le transfert de chaleur se fait par mouvement de matière.
- Le rayonnement : la propagation de la chaleur s'effectue par ondes électromagnétiques, alors, sans contact direct entre les matières.

#### 2.1.1.1 Les données nécessaires à la simulation

---

L'évaluation de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment, en tenant compte de ces mécanismes d'échange de chaleur, requiert la définition des paramètres de simulation du bâtiment, sa localisation, les matériaux de construction et les zones thermiques.

a. Les paramètres de simulation

Ils décrivent les paramètres qui sont utilisés lors de la simulation du bâtiment :

- L'orientation : elle indique l'orientation du bâtiment par rapport au vrai nord.
- Le type de terrain : le relief du site affecte la façon dont le vent frappe le bâtiment, tout comme la hauteur du bâtiment. Le tableau 1 montre la correspondance entre le type de terrain et sa description :

**Tableau 2-1. Correspondance entre le type de terrain et sa description**

Type de terrain	Description
<b>Banlieue</b>	Boisée, banlieue
<b>Ville</b>	Villes, périphérie de la ville, centre des grandes villes
<b>Océan</b>	Océan
<b>Urbain</b>	Urbaine, industrielle, espace couvert.

b. La localisation

La localisation décrit les paramètres pour l'emplacement du bâtiment :

- La latitude : par convention, la latitude nord est représentée par un chiffre positif, la latitude sud par un chiffre négatif, les minutes devant être représentées en des fractions décimales de 60.
- La longitude : par convention, la longitude Est est représentée par un chiffre positif et la longitude Ouest, par un chiffre négatif. Les minutes doivent être représentées en des fractions décimales de 60.
- Time zone : Le "time zone" représente le fuseau horaire de l'installation par rapport au temps moyen de Greenwich ou le méridien zéro. Les fuseaux horaires à l'Ouest du GMT sont représentés par des chiffres négatifs et ceux à l'Est du GMT, par des chiffres positifs. Les heures non entières peuvent être représentées en décimal, par exemple, 6,5 indique 06 :30.
- L'élévation : elle représente l'altitude de l'installation en mètres, ceci par rapport au niveau de la mer.

c. La construction - les matériaux

---

La construction décrit les propriétés physiques et la configuration pour l'enveloppe du bâtiment et les éléments intérieurs, autrement dit, les murs, toits, sols, fenêtres, portes du bâtiment.

Les éléments de construction sont caractérisés par leurs propriétés thermiques et leurs autres propriétés physiques :

- La rugosité : Cette propriété définit la rugosité relative d'une couche de matériau particulier. Ce paramètre n'influe que sur les coefficients de convection, plus spécifiquement sur le coefficient de convection extérieur.
- L'épaisseur : c'est la dimension de la couche dans la direction perpendiculaire au trajet principal de conduction de chaleur.
- La conductivité [ $W/(mK)$ ] : elle définit le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction.
- La densité [ $kg/m^3$ ].
- La chaleur spécifique [ $J/kgK$ ].
- L'absorption thermique : elle représente la fraction du rayonnement incident qui est absorbée par le matériau. Ce paramètre est utilisé lors du calcul de la longueur d'onde rayonnante échangée entre les différentes surfaces et il affecte les bilans thermiques de surface (à l'intérieur et à l'extérieur). Pour une longueur d'onde longue, l'échange rayonnant, l'émissivité thermique et l'émission thermique sont égaux à l'absorptance thermique. Les valeurs de ce paramètre doivent être comprises entre 0.0 et 1.0 (avec 1.0 représente l'absorptance thermique du « corps noir »).
- L'absorption solaire : elle représente la fraction du rayonnement solaire incident qui est absorbée par le matériau. Le rayonnement solaire comprend le spectre visible ainsi que les spectres infrarouge et ultraviolet. Ce paramètre est utilisé lors du calcul de la quantité de rayonnement solaire incident et absorbé par les différentes surfaces et il affecte les bilans thermiques de surface (à l'intérieur et à l'extérieur). Les valeurs de ce paramètre doivent être comprises aussi entre 0.0 et 1.0.

- L'absorbance visible : elle définit la fraction du rayonnement incident de longueur d'onde visible qui est absorbée par le matériau. Un rayonnement de longueur d'onde visible est légèrement différent de celui du soleil en ce que la bande de longueur d'onde visible est beaucoup plus étroite tandis que le rayonnement solaire comprend les trois spectres précédents. Ce paramètre est utilisé lors du calcul de la quantité de radiation visible incidente et absorbée par différentes surfaces en affectant les bilans thermiques de surface (à l'intérieur et à l'extérieur) ainsi que les calculs d'éclairage naturel. Les valeurs de ce paramètre doivent être comprises entre 0.0 et 1.0.

#### d. Zone thermique Géométrie / Description

---

Le bâtiment ne peut être simulé sans zones thermiques et surfaces bâties. Ce groupe d'objets (zone, surfaces bâties) décrit les caractéristiques des zones thermiques ainsi que les détails de chaque surface à modéliser. Les surfaces d'ombrage y sont incluses.

Par chaque surface, on entend :

- Les murs,
- les ouvertures : fenêtres et portes,
- les plafonds,
- les planchers,
- les toitures.

#### 2.1.1.2 Modélisation du bâtiment typiquement Malagasy

---

Le site considéré se situe dans les périphéries ou zones suburbaines et a pour coordonnées :

- Latitude (°) =  $-18.78$
- Longitude (°) =  $47.46$

L'altitude du site est de 1 276m. Le site est orienté de  $0^\circ$  par rapport au nord.

a. La construction

Les éléments qui définissent la construction sont constitués par des couches de matériaux. Ces matériaux sont caractérisés par leurs propriétés générales (conductivité thermique, chaleur spécifique et volume massique) et par leurs propriétés de surface (absorbance thermique « émissivité », absorbance solaire, absorption du rayonnement visible et rugosité).

Les murs sont constitués de 3 couches : deux couches d'enduit (interne et externe), et une couche de briques.

**Tableau 2-2- Propriétés générales et propriétés de surface des murs**

Murs	Couches	Epaisseur [m]	GENERALES			PROPRIETES DE SURFACE			
			Conductivité [W/m - K]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Murs externes	Enduit	<b>0.01</b>	<b>1.65</b>	<b>900</b>	<b>2400</b>	<b>0.9</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>Rugueux</b>
	Brique de Madagascar	<b>0.22</b>	<b>0.69</b>	<b>950</b>	<b>1500</b>	<b>0.9</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>Rugueux</b>
	Enduit	<b>0.01</b>	<b>1.65</b>	<b>900</b>	<b>2400</b>	<b>0.9</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>Rugueux</b>
Murs internes	Enduit	<b>0.01</b>	<b>1.65</b>	<b>900</b>	<b>2400</b>	<b>0.9</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>Rugueux</b>
	Brique de Madagascar	<b>0.11</b>	<b>0.69</b>	<b>950</b>	<b>1500</b>	<b>0.9</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>Rugueux</b>
	Enduit	<b>0.01</b>	<b>1.65</b>	<b>900</b>	<b>2400</b>	<b>0.9</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>Rugueux</b>

1. Toits / planchers/ dalles/plafonds

Le toit est une tôle ondulée de couleur bleue claire comme l'indique le tableau 3.

Les planchers bas sur terrain sont constitués de 2 couches :

- Pour la salle de bain : nous avons une couche de revêtement en carrelage (externe) et une dalle en béton (interne).
- Pour les autres zones : une couche de revêtement en bois (externe) est placée au-dessus d'une dalle en béton (interne).

Le plafond est fait en bois, généralement du pin.

**Tableau 2-3- Propriétés générales et celles de surface du toit, du plancher et du plafond**

			GENERAL			PROPRIETE DE SURFACE			
composants	Couches	Epaisseur [m]	Conductivité [W/Km <sup>2</sup> ]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Toit	Tôle ondulée	<b>0.75 mm</b>	<b>45.28</b>	<b>500</b>	<b>7824</b>	<b>0.9</b>	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	Lisse
Plancher bas sur terrain (SDB)	Carrelage	<b>0.02</b>	<b>3.5</b>	<b>1000</b>	<b>2800</b>	<b>0.9</b>	<b>0.58</b>	<b>0.58</b>	Moyen
	Dalle (béton)	<b>0.15</b>	<b>1.95</b>	<b>900</b>	<b>2400</b>	<b>0.9</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	Rugueux
Plancher bas sur terrain (~SDB)	Parkex	<b>0.01</b>	<b>0.15</b>	<b>1630</b>	<b>608</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	Moyen
	Dalle (béton)	<b>0.15</b>	<b>1.95</b>	<b>900</b>	<b>2400</b>	<b>0.9</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	Rugueux
Plafond	Volige	<b>0.005</b>	<b>0.15</b>	<b>1630</b>	<b>608</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	Rugueux

## 2. Portes

La porte extérieure ainsi que celles intérieures (communications) sont construites en bois. Leurs propriétés générales et celles de surface sont données par le Tableau 2-4.

**Tableau 2-4- Propriétés générales et celles de surface des portes**

			GENERAL			PROPRIETE DE SURFACE			
Portes	Couches	Epaisseur [m]	Conductivité [W/Km <sup>2</sup> ]	Chaleur spécifique [J/kgK]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Absorbance thermique (émissivité)	Absorbance solaire	Absorption du rayonnement visible	Rugosité
Portes extérieures	<b>Bois</b>	<b>0.04</b>	<b>0.15</b>	<b>1630</b>	<b>608</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>Moyen</b>

### 3. Les ouvertures

---

On entend par ouverture les aérations et fenêtres. Ces ouvertures comportent communément des cadres ou/et des vitrages.

Les vitrages sont définis par leur nombre (simple, double, triple...) et par les différentes propriétés des vitres. Dans notre cas, un simple vitrage est utilisé, l'épaisseur du vitre est de 3mm et sa conductivité,  $0.9 [W/(m K)]$

Quant à la transmission solaire, le facteur quantifiant la proportion du rayonnement solaire est celle traversant le vitrage seul. Un pourcentage faible indique une bonne réduction de l'énergie solaire par le vitrage. Dans notre cas, elle est estimée à 0,858.

Le facteur de réflexion solaire est le facteur quantifiant la proportion du rayonnement solaire réfléchi par le vitrage seul. Un pourcentage faible indique une bonne réflexion de l'énergie solaire par le vitrage. Sa valeur est estimée à 0.075.

La transmission visible appelée aussi transmission lumineuse ou transmission visuelle est un facteur qui indique le pourcentage de rayonnement lumineux passant à travers la vitre, perceptible par l'œil humain. Elle est estimée à 0.898.

Beaucoup de moteurs de calcul qui tiennent compte de ces phénomènes physiques utilisés en thermique de bâtiment ont été déjà conçus. Parmi eux, nous avons EnergyPlus qui est le plus utilisé dans ce domaine.



### 2.1.1.3 EnergyPlus [6]:

EnergyPlus est un logiciel de simulation thermique dynamique ayant trois composants de base qui sont :

- un gestionnaire de simulation,
- un module de chaleur et de simulation du bilan de masse,
- un module de simulation de systèmes de construction.

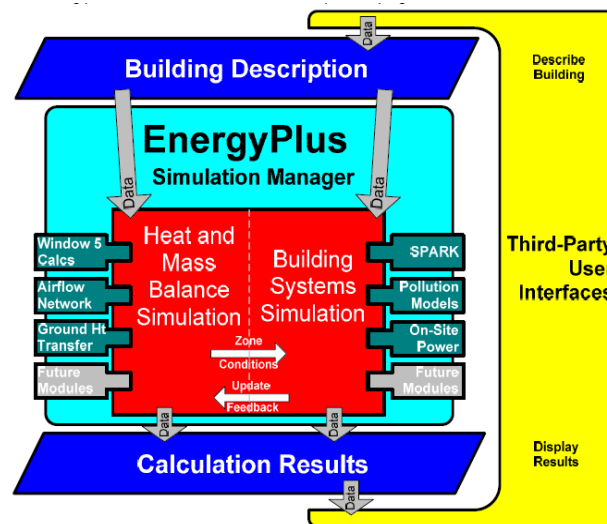


Figure 11. Hiérarchie et besoin d'EnergyPlus

#### a. Prise en compte des conditions climatiques

Les conditions climatiques sont directement introduites dans EnergyPlus sous format .epw (*EnergyPlus Weatherdata*).

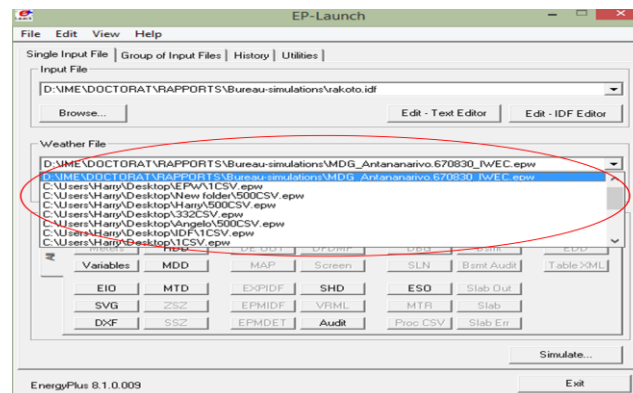


Figure 12. Introduction des données météorologiques dans EnergyPlus

b. Prise en compte des dispositions constructives

EnergyPlus prend en compte tous les éléments nécessaires à la simulation dynamique d'un bâtiment, excepté les données météorologiques, à partir d'un fichier .idf (*Input Data File*). Ce fichier peut être créé en utilisant l'interface d'EnergyPlus (EP-Launch) :

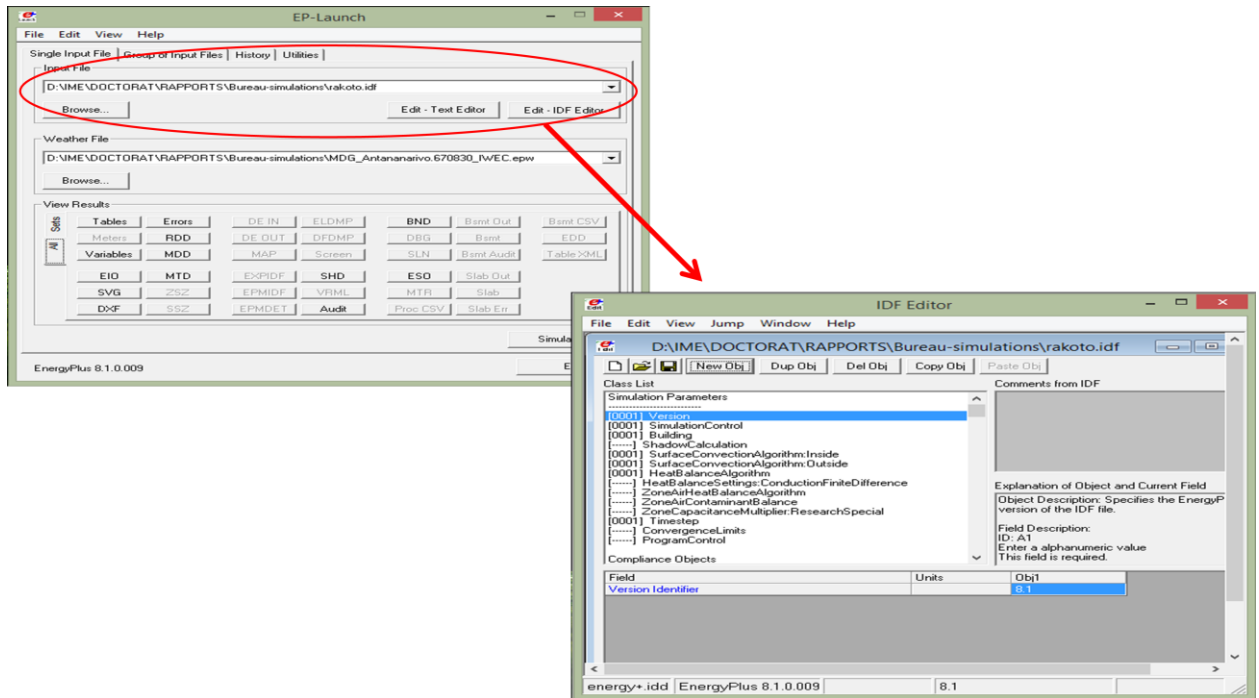


Figure 13. Introduction et création du fichier IDF dans EnergyPlus

2.1.2 Modélisation du confort thermique

2.1.2.1 Les modèles quantitatifs

Il existe plusieurs modèles mathématiques pour évaluer le confort thermique. La plupart de ces modèles de prédiction de confort thermique utilisent une échelle de sensation thermique de sept ou neuf points dont :

- 3 : chaud
- 2 : moins chaud
- 1 : légèrement chaud
- 0 : neutre
- -1 : légèrement frais
- -2 : frais
- -3 : froid

ou

— 4 : très chaud	— 1 : légèrement chaud	— -2 : frais
— 3 : chaud	— 0 : neutre	— -3 : froid
— 2 : moins chaud	— -1 : légèrement frais	— -4 : très froid

a. Les processus d'échange de chaleur du corps

---

En se basant sur les analyse physique et physiologique du système homme-environnement, le confort thermique peut être apprécié analytiquement via le bilan thermique d'un individu. Il s'évalue par la somme algébrique des différents flux de chaleur métabolique produits et échangés par l'individu avec son environnement. Il s'écrit de la façon suivante [4] :

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S \quad (1)$$

Où

$$Q_{sk} = C + R + K + E_{sk} \quad (2)$$

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} \quad (3)$$

$$S = S_{sk} + S_{cr} \quad (4)$$

Avec

$M$  : le taux de métabolisme [ $W/m^2$ ],

$W$  : le travail externe [ $W/m^2$ ],

$Q_{sk}$  : le flux de chaleur échangée à la surface cutanée [ $W/m^2$ ],

$C_{peau}$  : le flux de chaleur sensible échangée par convection à la surface de la peau [ $W/m^2$ ],

$R_{peau}$  : le flux de chaleur sensible échangée par rayonnement à la surface de la peau [ $W/m^2$ ],

$K$  : le flux de chaleur sensible échangée par conduction à la surface de la peau [ $W/m^2$ ],

$E_{sk}$  : le flux de chaleur latente échangée par évaporation à la surface de la peau  
[ $W/m^2$ ],

$Q_{res}$  : le flux de chaleur échangée par voie respiratoire [ $W/m^2$ ],

$C_{res}$  : le flux de chaleur échangée par convection respiratoire [ $W/m^2$ ],

$E_{res}$  : le flux de chaleur échangée par évaporation respiratoire [ $W/m^2$ ],

$S$  : le taux de chaleur stockée par l'organisme [ $W/m^2$ ],

$S_{sk}$  : le taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps [ $W/m^2$ ],

$S_{cr}$  : le taux de chaleur stockée dans la peau [ $W/m^2$ ].

De nombreuses modifications et améliorations de ce modèle ont conduit aux deux modèles les plus utilisés tels que :

- Le modèle de Fanger,
- Le modèle de Pierce.

Dans les deux cas, les relations sont définies a priori (sur la base des principes physiques) et les diverses constantes et coefficients sont déterminés par des mesures.

### 1. Modèle de Fanger

Le modèle de Fanger a été le premier développé [7] [8]. Le modèle mathématique développé par Fanger est probablement le plus connu et est le plus facile à utiliser car il a été mis sous forme des graphiques.

Fanger utilise la forme de sept points d'une échelle de sensation thermique avec de nombreuses expériences sur des sujets humains dans divers environnements. Il met en relation les sujets aux réponses à des variables qui influent sur l'état de confort thermique. Le modèle de Fanger est basé sur une analyse de l'énergie qui prend en compte tous les modes de perte d'énergie à partir du corps, y compris celle par convection et par rayonnement à travers la surface extérieure du vêtement, celle par diffusion de vapeur d'eau à travers la peau, celle par évaporation de la sueur à la surface de la peau, celle par chaleur latente et par respiration à sec et celle due au transfert de chaleur de la peau. Le modèle suppose que la personne est thermiquement à l'état d'équilibre avec son environnement.

## 2. Modèle de Pierce

---

Le modèle de Pierce [9] [10] [11] [12] à deux nœuds considère le corps humain comme deux compartiments concentriques et isothermes, l'un représentant la partie interne ou noyau (où toute la chaleur métabolique est supposée comme étant générée par l'individu et la peau, constituant l'autre compartiment. Cela permet la prise en compte de la conduction de la chaleur passive du compartiment de noyau sur la peau.

En outre, le modèle prend en compte les écarts de la température du noyau et celle de la peau et aussi de la moyenne pondérée de la température corporelle à partir de leurs points de réglage respectifs. Les mécanismes de thermorégulation effectifs (transpiration réglementation, circulation sanguine de la peau, frissons etc.) sont définis en termes de signaux thermiques de la centrale, de la peau et du corps.

### b. Mesures de confort

---

Pour évaluer le confort hygrothermique, des indices de confort ont été développés. Ces indices sont classés en deux catégories :

- les indices empiriques,
- les indices analytiques.

#### 1. Les indices empiriques

---

Les indices empiriques consistent à tracer sur un diagramme (ex : psychrométrique) ou sur un monogramme des lignes ou zones de confort. Parmi ces indices, on peut citer :

- la température effective [13],
- la température effective corrigée [14],
- la température de globe de la bulbe humide [15],
- la température opérative [16],
- la température équivalente [17] [18],
- la chaleur équivalente [19],
- la température résultante [20],
- l'indice de confort équatorial [21],
- l'indice d'été tropicale [22].

## 2. Les indices analytiques

---

Les indices analytiques consistent à donner une formulation mathématique de la sensation du confort en se basant sur des observations et/ou des enquêtes :

- l'indice de contrainte thermique [23],
- le rapport de l'acceptation thermique [24],
- le taux de transpiration prévue [25],
- l'indice de stress de chaleur [26],
- l'indice de contrainte relative [27],
- l'indice de stress thermique [28] [29],
- le Predicted Mean Vote (PMV) [30],
- la température effective standard [10].

Les indices de confort que ce soit empiriques ou analytiques ont été utilisés à des fins différentes :

- fixation des limites ou des seuils d'exposition,
- définition du confort ou des limites de confort, c'est à dire la «zone de confort», qui est applicable dans les situations résidentielles ou de bureau,
- détermination des mesures de contrôle optimales (par exemple le choix entre le mouvement de l'air ou de l'air conditionné, du dépistage contre la chaleur rayonnante (dans l'industrie) ou de la réduction de la période d'exposition,
- classification climatique.

Le modèle de confort de Fanger est probablement l'analyse la plus minutieuse et la plus détaillée de la relation thermique humaine avec l'environnement proximal. Son indice analytique, le PMV (vote moyen prévu) forme la base et est incorporé dans les normes : la détermination de cet indice et la spécification des conditions du confort thermique.

Le modèle à deux nœuds de Pierce et la température effective forment la base de la norme ASHRAE : conditions environnementales thermiques pour l'occupation humaine.

Presque invariablement, les indices de chaleur tels que décrits précédemment ont été établis à partir d'études contrôlées de chambre. Inévitablement, ils précisent une valeur optimale qui a été supposée s'appliquer également à toutes les personnes. Fanger a déclaré catégoriquement que son équation du confort et de l'indice PMV sont valables pour tous les êtres humains et que les préférences thermiques de l'homme sont les mêmes quelle que soit leur situation géographique ou climatique. Cependant, les enquêtes sur le terrain, à l'aide de «vrais» gens engagés dans des tâches «réelles» dans des «vrais» environnements bâtis, plutôt que lors des expériences de laboratoire sur le confort thermique, ont produit des observations apparemment anormales qui suggèrent que la préférence thermique d'une personne a également une composante géographique.

#### 2.1.2.2 Les modèles qualitatifs

---

GIVONI en 1978 a proposé d'utiliser le diagramme psychrométrique où il a exprimé les techniques et les dispositifs architecturaux à utiliser pour établir le confort intérieur [31].

En 1980, SZOKOLAY et al ont soulevé des problèmes liés à l'incohérence entre les résultats du confort thermique calculés et ceux du confort réel perçus par les sujets [32]. Le confort se caractérise par la sensation que ressent une personne par rapport à la température et à l'humidité ambiante du local où elle se trouve [33]; en effet, les ambiances thermiques des locaux ont sur l'homme des effets physiologiques et des impacts différents plus ou moins gênants selon leur température et l'humidité faible ou élevée rend l'atmosphère inconfortable. Ainsi, ils ont proposé une autre méthode pour établir la zone de confort et les zones de contrôle potentiel dans un diagramme psychrométrique (température et humidité).

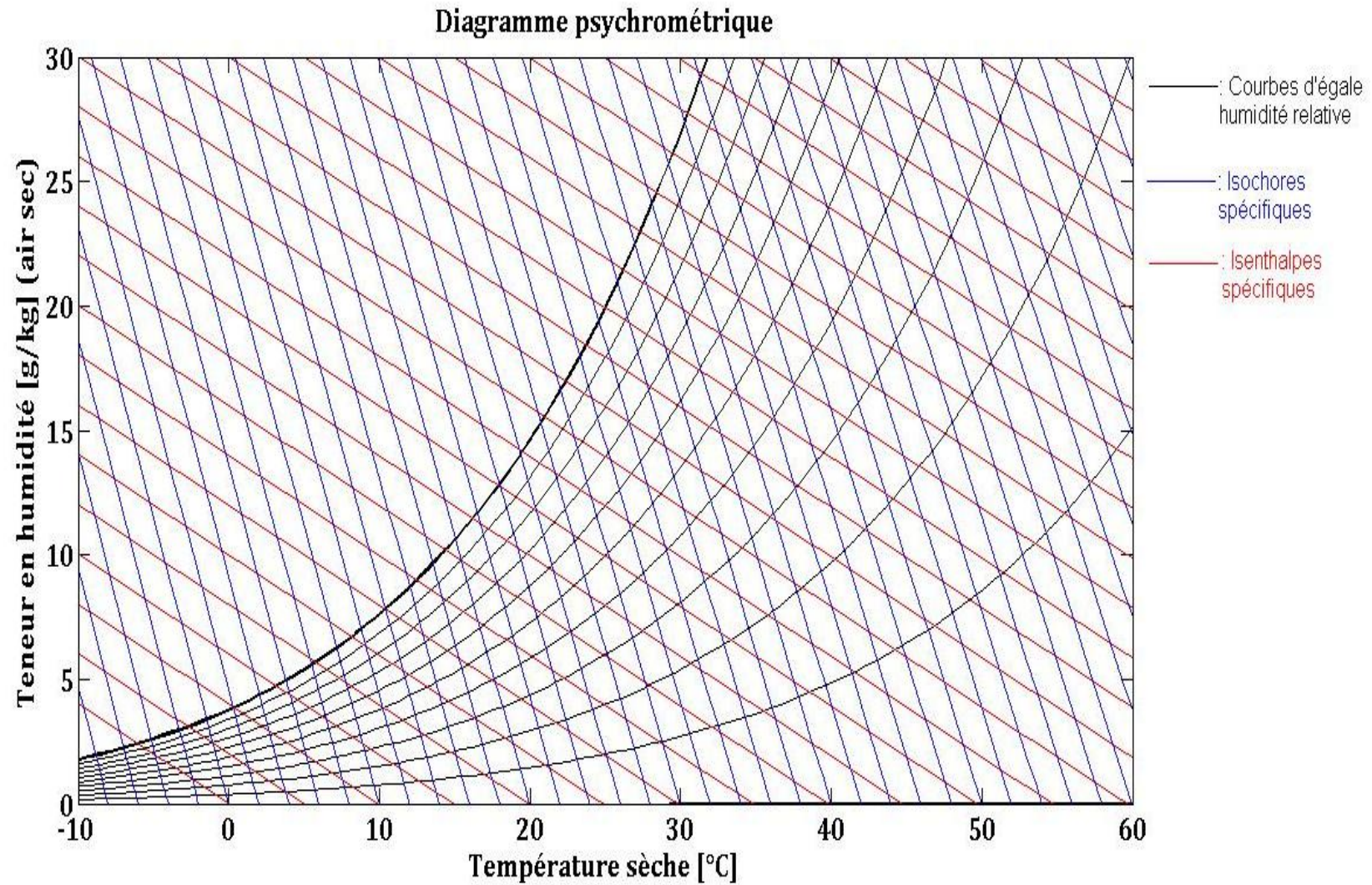


Figure 14. Diagramme psychrométrique



Méthode :

a. Zone de confort

Définie par son point neutre  $T_n$  obtenu par l'intersection de la température neutre et l'humidité relative portée à  $e = 50\%$  d'humidité relative, cette zone est délimitée par quatre points de température humide où :

$$T_n = 17,6 + (0,31 * T_m) \quad (5)$$

Où

$$T_m = \sum t_m / 12 \quad (6)$$

Les points 1, 2, 3 et 4 qui délimitent la zone de confort sont donnés par les relations :

$$\begin{aligned} T_1 &= T_n + (Ahn - 12) * 0.025 * (T_n - 14) - 2 \\ T_2 &= T_1 + 4 \\ T_3 &= T_1 + 0.2 * (T_1 - 14) \\ T_4 &= T_2 + 0.2 * (T_2 - 14) \end{aligned} \quad (7)$$

$Ahn$  : l'humidité absolue du point de neutralité.

$$Ahn \left[ \frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'air sec}} \right] = e * x_{sat} \quad (8)$$

Où

$x_{sat}$  : l'humidité absolue de l'air saturé.

$$x_{sat} \left[ \frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'air sec}} \right] = 0.62 * p_{sat} / (p_m - p_{sat}) \quad (9)$$

Avec

$p_{sat}(T_n)$  : la pression de saturation de l'air à la température  $T_n$ .

$$p_{sat}(T_n) [hPa] = 1013,25 * 10^{\left(17,443 - \left(\frac{2795}{273+T_n}\right) - 3.868 * \log_{10}(273+T_n)\right)} \quad (10)$$

$$p_{sat}(T_n) = 29,39[hPa],$$

et

$$p_m = 1013,25[hPa]$$

Les points 1 et 2 sont portés à la ligne d'humidité absolue  $12g/kg$  et les points 3, 4, à la ligne d'humidité absolue  $4g/kg$ .

Les points 1 et 2 sont portés à ligne d'humidité absolue  $12g/kg$ ; et les points 3, 4 à la ligne d'humidité absolue  $4g/kg$ .

#### b. Zone de contrôle potentiel pour les périodes froides

---

C'est la zone de chauffage passif. Elle est délimitée par un seul point 5 portée à la courbe de saturation  $HB = 100\%$  où :

$$T_5 = T_n + 0,36 - 0,0025 * H_v \quad (11)$$

( $H_v$  représente la moyenne journalière totale d'irradiations solaires en  $Wh/m^2$  d'une surface verticale sud pour le mois le plus froid).

#### c. Zones de contrôle potentiel pour les périodes chaudes :

---

##### 1. Zone d'effet de masse

---

La détermination de la variation maximale de la température pour le mois le plus chaud (Mars)  $dT_m$  permet d'obtenir le premier point de cette zone.

$$dT_m = T_{max} - T_{min} \quad (12)$$

Les points qui délimitent cette zone sont :

$$\begin{aligned} T_6 &= T_2 + 0,5 (dT_m) \\ T_7 &= T_6 + 0,05 (T_6 - 14) \\ T_8 &= T_6 + 0,2 * (T_6 - 14) \end{aligned} \quad (13)$$

Le point 6 est porté par la droite d'humidité absolue  $14g/kg$ .

Le point 7 est porté par la droite d'humidité absolue  $12g/kg$

Le point 8 est porté par la droite d'humidité absolue  $4g/kg$

La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'humidité relative du premier point de la zone de confort.

## 2. Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne

---

La zone d'effet de masse avec ventilation nocturne est délimitée par 3 points :

$$T_9 = T_2 + 0,8 * (dTm)$$

$$T_{10} = T_9 - 0,05 * (T_9 - 14) \quad (14)$$

$$T_{11} = T_9 - 0,05 * (T_9 - 14)$$

Le point 9 appartient à la ligne  $14g/kg$  d'humidité absolue ;

Le point 10 appartient à la ligne  $12g/kg$  d'humidité absolue ;

Le point 11 appartient à la ligne  $4g/kg$  d'humidité absolue.

## 3. Zone de ventilation naturelle-mouvement d'air sur la surface de peau

---

La zone de ventilation naturelle-mouvement d'air sur la surface de la peau est délimitée par 4 points.

— Pour une vitesse de vent avoisinant  $1m/s$ , on a les 2 premiers points 12 et 13 :

$$T_{12} = T_2 + 5 \quad (15)$$

$$T_{13} = T_{12} + 0,1 * (T_{12} - 14)$$

— Pour une vitesse de vent proche  $1,5m/s$ , on a les points :

$$T_{12} = T_2 + 6,5 \quad (16)$$

$$T_{13} = T_{12} + 0,1 (T_{12} - 14)$$

Les autres points sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} T_{14} &= T_1 \\ T_{15} &= T_{12} - 0,18 (T_{12} - 14) \end{aligned} \quad (17)$$

Le point 12 est porté par la ligne d'humidité absolue 12 g/kg. Quant au point 13, il appartient à la droite 4 g/kg d'humidité absolue.

Les points 14 et 15 sont portés par la courbe 90 % d'humidité relative.

#### 4. Zone de refroidissement évaporatif direct

---

Cette zone est délimitée par un seul point :

$$T_{16} = T_n + 12 \quad (18)$$

Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de températures humides du deuxième et troisième point de la zone de confort.

#### 5. Zone de refroidissement évaporatif indirect

---

La zone de refroidissement évaporatif indirect est limitée par un seul point. Ce point est porté par la ligne 14 g/kg d'humidité absolue.

$$T_{17} = T_n + 15 \quad (19)$$

### 2.1.2.3 Données météorologiques de référence

---

#### 1. Fichier source

---

Au cours des 20 dernières années, plusieurs groupes de chercheurs ont mis au point des bases de données météorologiques horaires spécifiquement conçues pour être utilisées dans des simulations énergétiques. L'une des premières est le *Test Reference Year* (TRY), [34]. Le TRY contient les données climatiques suivantes : la température sèche, la température humide, le point de rosée, la direction et la vitesse du vent, la pression barométrique, l'humidité relative, la couverture nuageuse et son type et l'espace réservé pour le rayonnement solaire. Toutefois, aucune donnée solaire mesurée ou calculée n'est incluse. Lorsqu'il est utilisé pour des simulations énergétiques, le

programme de simulation doit calculer le rayonnement solaire sur la base de la couverture nuageuse et le type de nuage (informations disponibles dans les données d'essai). Or, les programmes de simulation ne peuvent pas traiter les interactions complexes et utilisent des méthodes simplifiées ou des méthodes qui ne sont pas à jour. Une autre faiblesse de l'ensemble de données TRY est la méthode utilisée pour sélectionner les données. Les données TRY sont une année historique réelle de la météo, sélectionnée à l'aide d'un processus où des années de la période d'enregistrement (~ 1948-1975) qui ont eu des mois avec des températures moyennes extrêmement élevées ou basses. Ces mois sont progressivement éliminés jusqu'à ce que seulement un an est resté. Cette tendance à traduire par une année particulièrement douce qui, soit par intention ou par défaut, exclut des conditions extrêmes. Les TRY sont disponibles pour 60 sites aux États-Unis.

Pour faire face aux limitations de TRY, en particulier le manque de données solaires, le Centre National des Données Climatiques (NCDC) a travaillé avec *Sandia National Laboratory* (SNL) pour créer un nouvel ensemble de données. Les *Typicals Meteorological Year* (TMY) comprennent, en plus des données contenues dans TRY, la totalité des données horizontales et directes normales du rayonnement solaire pour 234 sites américains [35]. Vingt-six emplacements ont mesuré des données solaires et les données solaires pour les autres 208 emplacements ont été calculées à partir de la couverture nuageuse et du type de nuage. Cela a éliminé la nécessité, pour les programmes de simulation, de calculer séparément les données solaires. Les données de cet ensemble se composent de 12 mois choisis dans une période d'environ 23 ans de l'enregistrement (1952-1975, les données disponibles varient selon l'endroit) pour représenter les mois typiques. La méthode utilisée est similaire à celle utilisée pour le TRY, mais des mois individuels sont choisis plutôt que des années entières. Les mois TMY ont été sélectionnés sur la base d'une pondération composite mensuelle du rayonnement solaire, de la température sèche, du point de rosée et de la vitesse du vent par rapport à la distribution à long terme de ces valeurs. Les mois qui étaient plus proches de la distribution pondérée à long terme ont été ainsi sélectionnés.

Pour les autres localisations, ailleurs qu'aux Etats Unis comme à Madagascar, l'ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*) ont développé des ensembles de données météorologiques, le IWEC (*International Weather Energy Calculation*), basé sur le même approche que le TMY [36].

Dans ce travail, ces fichiers moyens sont utilisés comme fichiers sources ou références à cause de leurs disponibilités et leurs compatibilités au moteur de calcul EnergyPlus.

## 2. Périodes de simulation

---

En utilisant les fichiers moyens, d'après la classification ASHRAE, le climat dans la région d'Antananarivo est classé comme un climat subtropical humide (été chaud).

Une année est divisée ainsi en deux saisons bien distinctes :

- Eté : Octobre -Avril
- Hiver : Mai – Septembre

Les périodes typiques et extrêmes dans le site sont :

- La semaine typique de la période chaude (proche de la température moyenne estivale) est 12 février-18 février dont la température moyenne est de 20,81°C
- La semaine typique de la période froide (proche de la température moyenne hivernale) est 8 juillet-14 juillet dont la température moyenne est de 15,20°C.
- La période extrêmement chaude a eu lieu le 19 mars jusqu'au 25 mars. La température maximale est de 29,50°C
- La période extrêmement froide a eu lieu le 29 juillet jusqu'au 4 août. La température minimale est de 5,80°C.

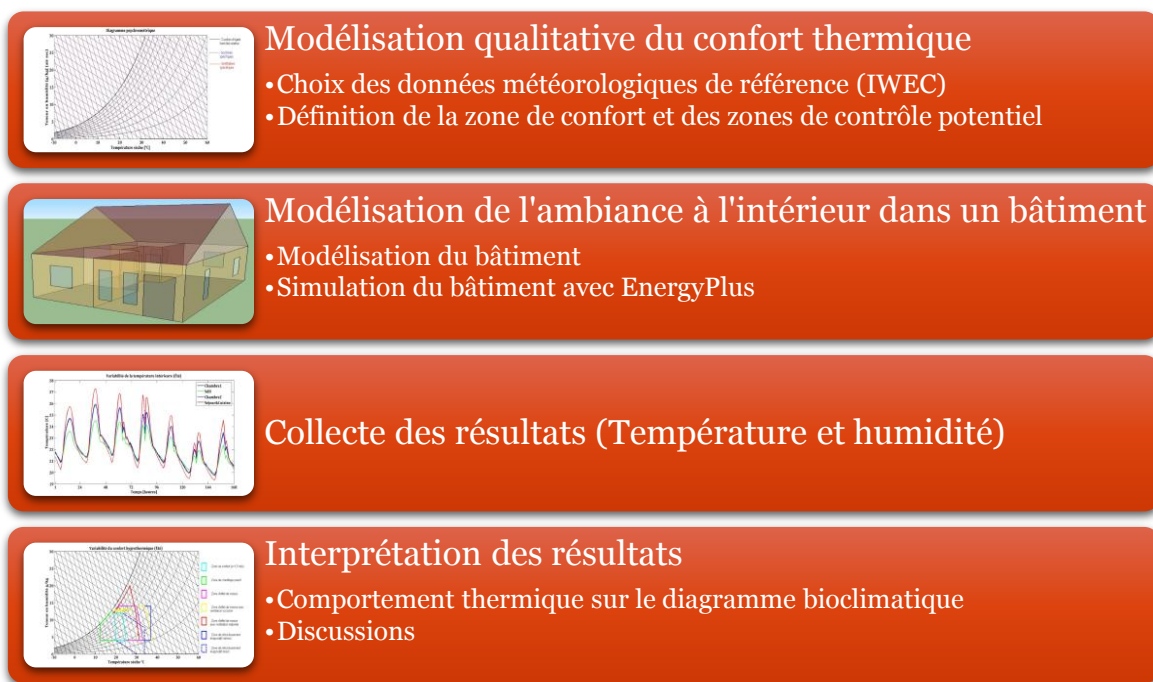
L'étude est effectuée durant les 2 semaines typiques de chaque saison : la semaine typique de la saison chaude (12 février-18 février) et la semaine typique de la saison froide (8 juillet-14 juillet).

## 2.2 Variabilité de l'ambiance

### 2.2.1 Démarche méthodologique

L'objectif est de mettre en évidence la variabilité de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment typique malagasy. Pour ce faire, la démarche méthodologique ci-après a été optée :

- Modélisation qualitative du confort thermique : Cette première étape consiste à tracer dans le diagramme psychrométrique la zone de confort et les zones de contrôle potentielles de l'ambiance en se basant sur la méthode de Szokolay.
- Modélisation de l'ambiance à l'intérieur dans un bâtiment : Cette étape consiste à modéliser un bâtiment typiquement Malagasy avec EnergyPlus, et à simuler le bâtiment avec les données météorologiques de référence IWEC.
- Collecte des résultats.
- Interprétation des résultats.



**Figure 15. Démarche méthodologique pour la mise en évidence de la dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type**

### 2.2.2 Diagramme bioclimatique d'Antananarivo

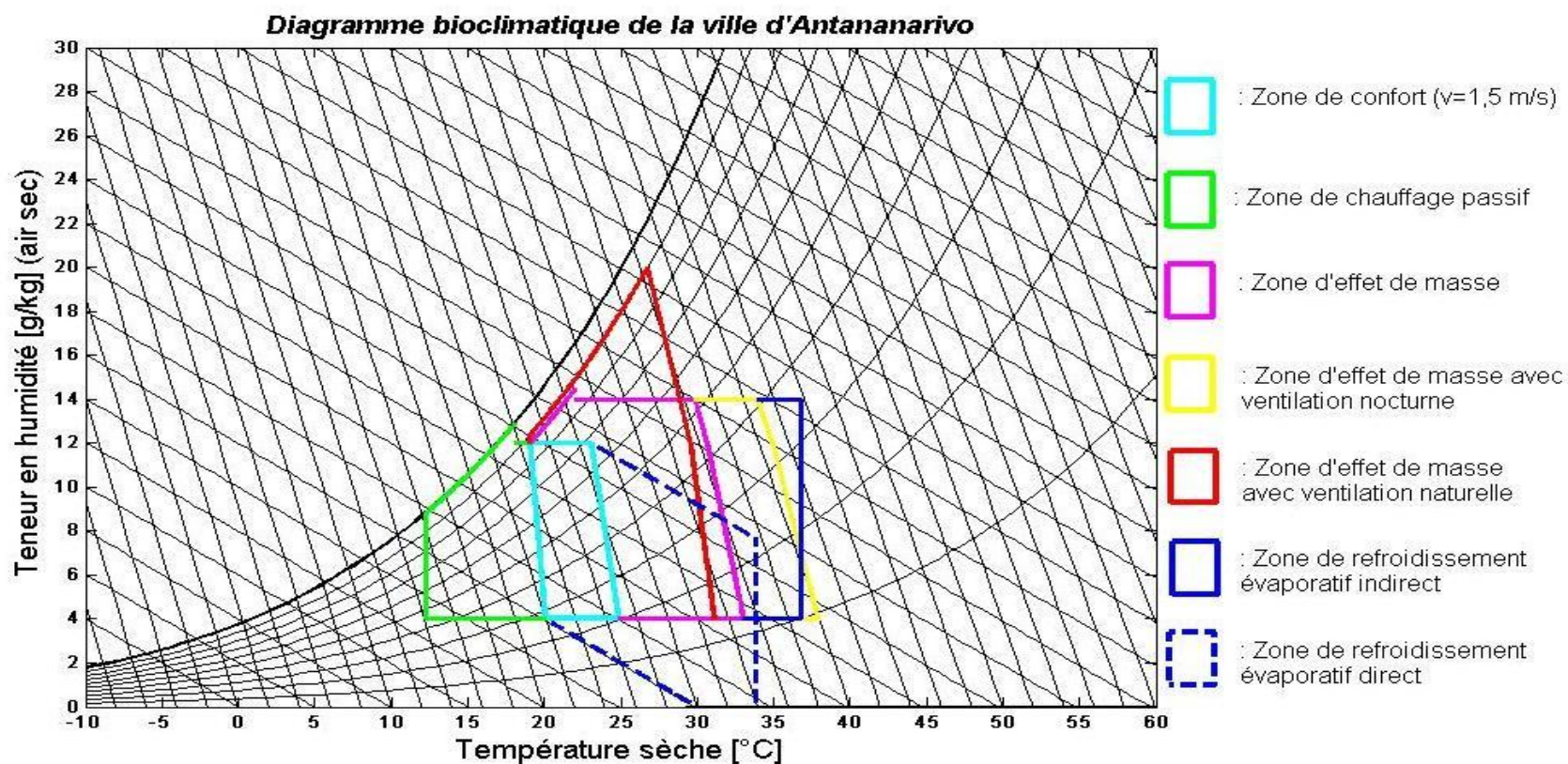


Figure 16. Diagramme bioclimatique de la région d'Antananarivo



Ce diagramme est basé sur les données météorologiques IWEK de la région d'Antananarivo en considérant une vitesse de vent  $v=1,5[m/s]$  .

Pour obtenir un confort hygrothermique, les températures de l'air ambiant dans les locaux doivent être comprises entre  $19,5^{\circ}C$  et  $24,8^{\circ}C$ , et l'air ambiant doit avoir un taux d'humidité relative entre 30% et 80%.

La zone de contrôle potentielle pour la saison froide dans laquelle le chauffage passif est nécessaire est délimitée par la température  $12,3^{\circ}C$  portée à la courbe de saturation  $B = 100 \%$  .

La zone de contrôle potentielle pour les périodes chaudes est subdivisée en 5 zones :

- La zone d'effet de masse est délimitée par les points de coordonnées respectives (29,85 ; 14), (30,64 ; 12), (33,02 ; 4) sur le diagramme. La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'humidité relative du premier point de la zone de confort.
- La zone d'effet de masse avec ventilation nocturne est délimitée par les points de coordonnées respectives (33,93 ; 14), (34,92 ; 12), (37,91 ; 4) sur le diagramme.
- La zone d'effet de masse avec ventilation naturelle est délimitée par 4 points : les 2 premiers points sont définis par (29,55 ; 12), (31,10 ; 4) ; les 2 autres points sont portés sur la courbe d'humidité relative 90% dont les températures sont respectivement égales à  $19,05^{\circ}C$  et  $26,75^{\circ}C$ .
- La zone de refroidissement évaporatif directe est délimitée par un seul point  $33,79^{\circ}C$ . Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de températures humides des deuxième et troisième points de la zone de confort.

La zone de refroidissement évaporatif indirect est limitée par un seul point  $36,79^{\circ}C$ . Ce point est porté par la ligne  $14g/kg$  d'humidité absolue.

## 2.2.3 Dynamique de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment

### 2.2.3.1 Température intérieure

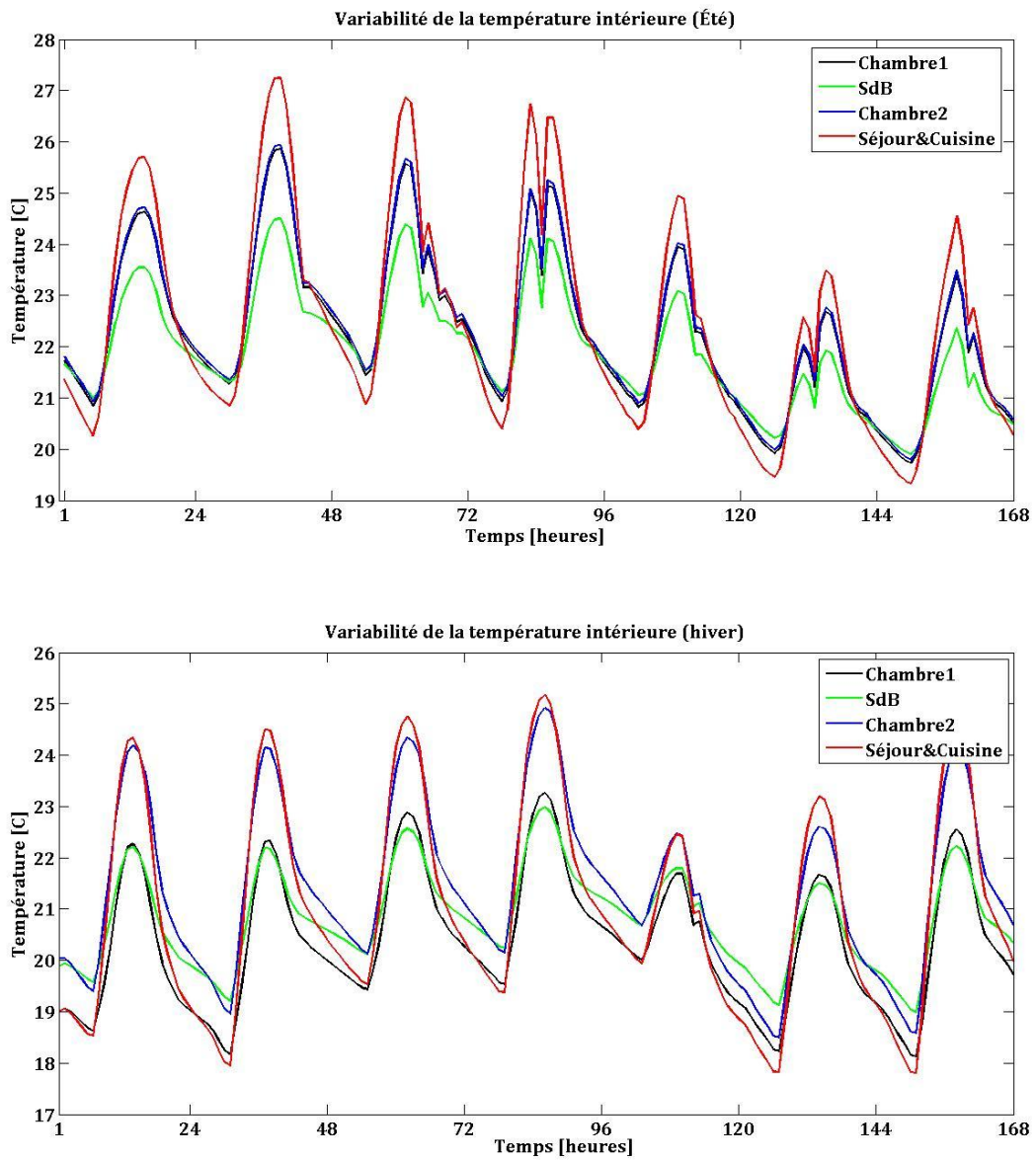


Figure 17. Variabilité de la température intérieure (été et hiver)

### 2.2.3.2 Humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment

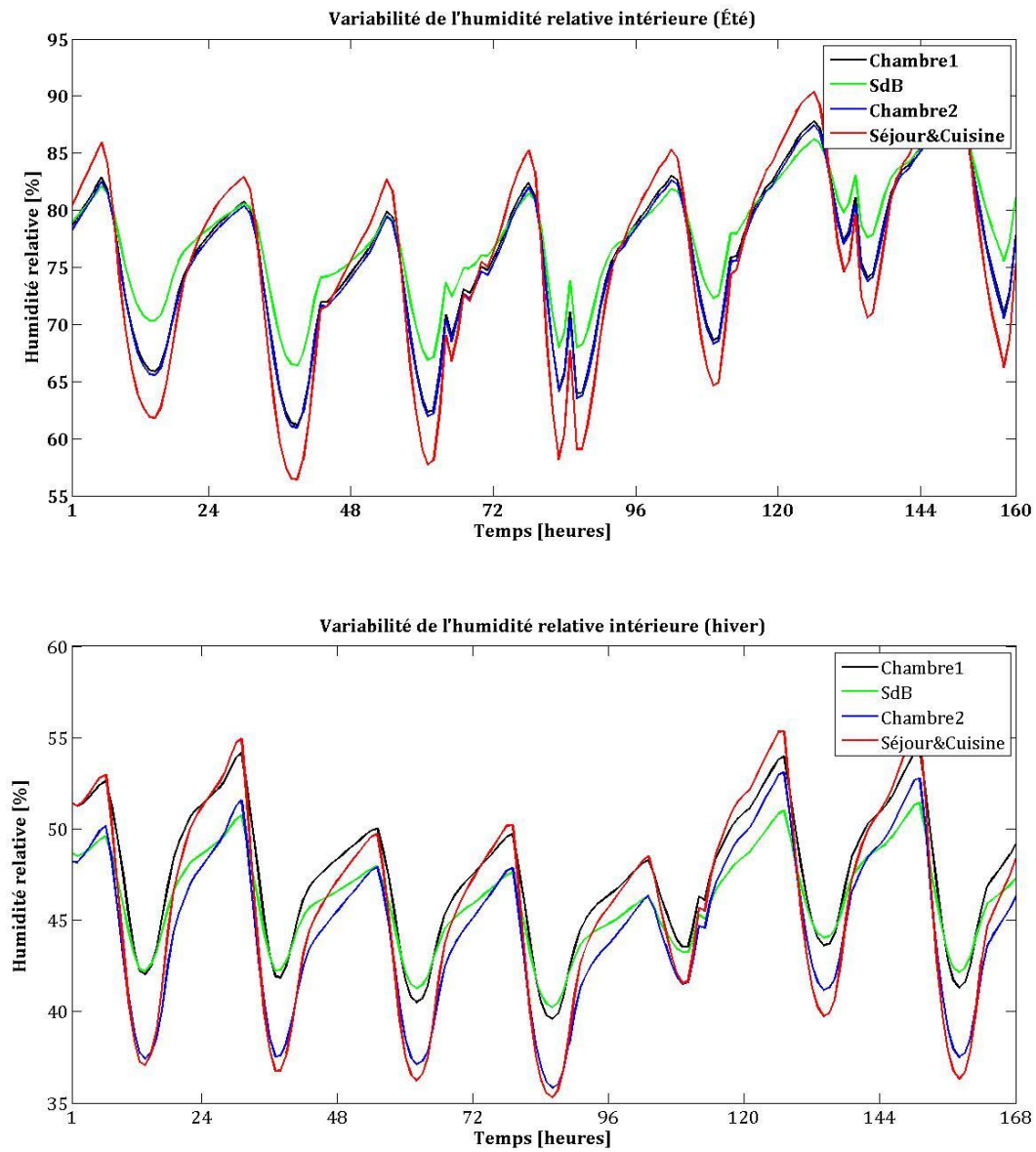


Figure 18. Variabilité de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment type (été et hiver).

## 2.2.4 Variabilité du confort hygrothermique

### 2.2.4.1 Confort d'été

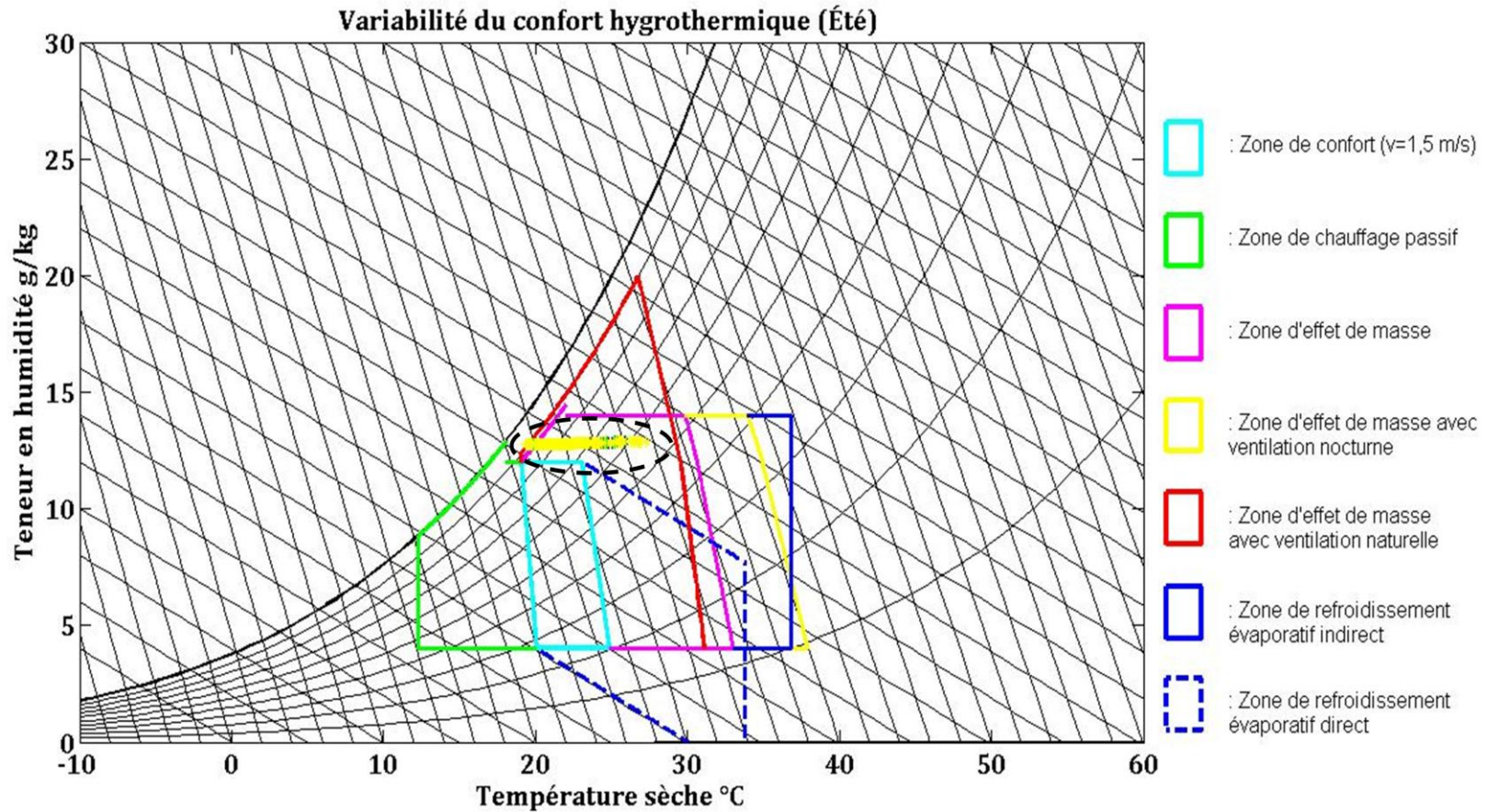


Figure 19. Dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type (été)

2.2.4.2 Confort d'hiver

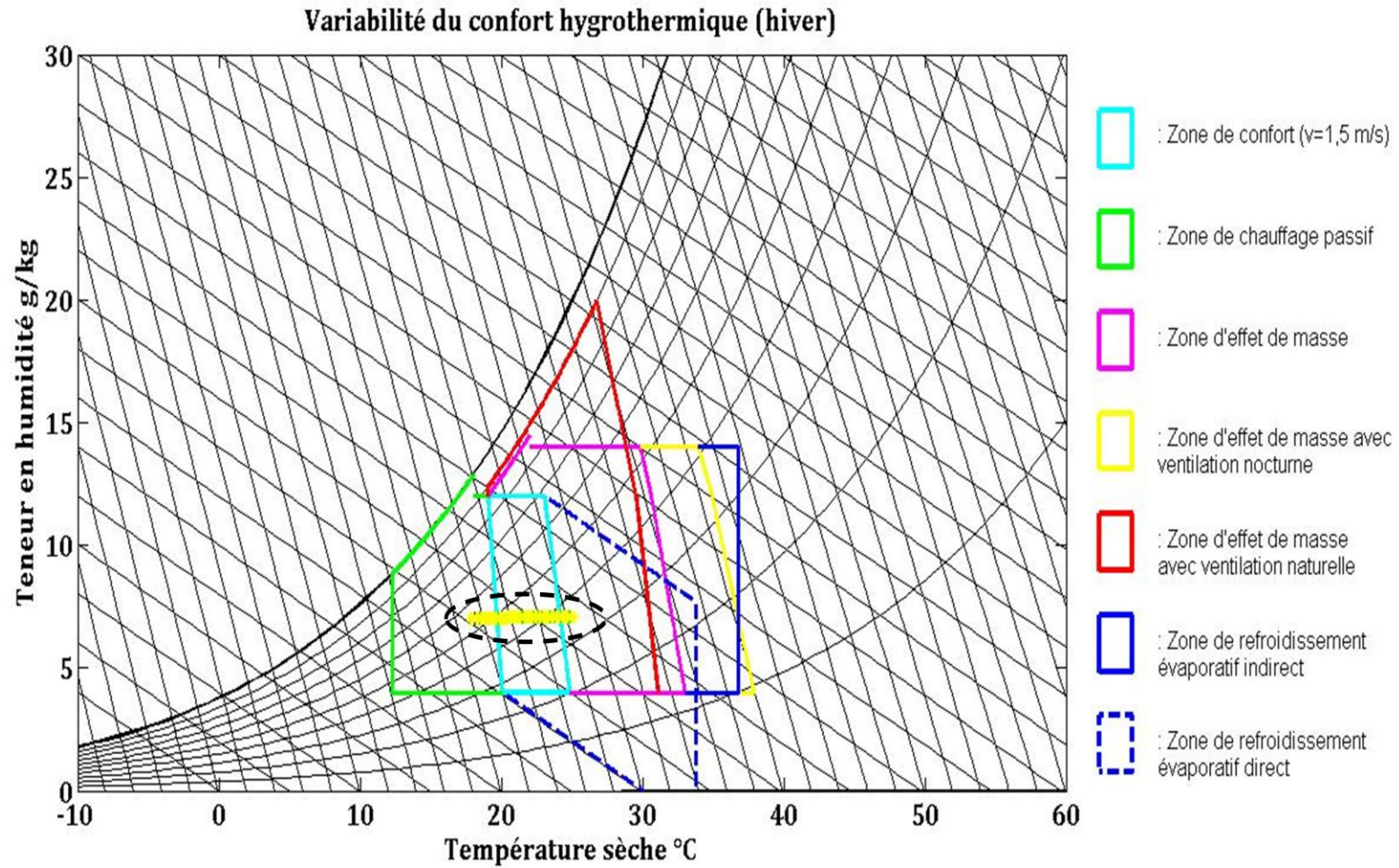


Figure 20. Dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type (hiver)

Durant la semaine typique de la saison chaude, la température de l'air ambiant dans le bâtiment varie en moyenne de 20°C à 26°C.

La variation maximale de la température durant la semaine typique de la saison chaude est de 7.5°C. La variation minimale de cette variable durant cette période est de 4.5°C.

Pendant la semaine typique de la saison froide, la température de l'air ambiant dans le bâtiment varie en moyenne de 18°C à 25°C.

**Tableau 2-5. Valeurs extrêmes et écart de la température à l'intérieur du bâtiment type (été)**

	<b>Chambre1</b>	<b>SdB</b>	<b>Chambre2</b>	<b>Séjour&amp;Cuisine</b>
<b>Température max</b>	25	22.5	25	25
<b>Température min</b>	18	19	18.5	17.5
<b>Ecart</b>	7	3.5	6.5	7.5

**Tableau 2-6. Valeurs extrêmes et écart de la température à l'intérieur du bâtiment type (hiver)**

	<b>Chambre1</b>	<b>SdB</b>	<b>Chambre2</b>	<b>Séjour&amp;Cuisine</b>
<b>Température max</b>	26	24.5	26	27
<b>Température min</b>	20	20	20	19.5
<b>Ecart</b>	6	4.5	6	7.5

La variation maximale de la température durant la semaine typique de la saison chaude est de 7.5°C (séjour&cuisine). La variation minimale de cette variable durant cette période est de 3.5°C(salle de bain).

Quant à l'humidité, elle varie de 57% à 92% durant la période de simulation de la saison chaude et de 38% à 57% pendant celle de la saison froide. L'écart maximal est de 36% pour la saison chaude et de 19% pour la saison froide.

**Tableau 2-7. Valeurs extrêmes et écart de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment type (été)**

	<b>Chambre1</b>	<b>SdB</b>	<b>Chambre2</b>	<b>Séjour&amp;cuisine</b>
<b>Humidité max</b>	<b>92</b>	<b>90</b>	<b>92</b>	<b>93</b>
<b>Humidité min</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	<b>60</b>	<b>57</b>
<b>Ecart</b>	<b>32</b>	<b>25</b>	<b>32</b>	<b>36</b>

**Tableau 2-8. Valeurs extrêmes et écart de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment type (hiver)**

	<b>Chambre1</b>	<b>SdB</b>	<b>Chambre2</b>	<b>Séjour&amp;cuisine</b>
<b>Humidité max</b>	<b>55</b>	<b>52</b>	<b>55</b>	<b>57</b>
<b>Humidité min</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>38</b>
<b>Ecart</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>19</b>

Concernant le confort thermique, une dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment est constatée.

Pendant la semaine typique de la saison chaude, l'ambiance dans tout le bâtiment est répandue dans trois zones : zone de chauffage passif, zone d'effet de masse avec ventilation nocturne et zone d'effet de masse.

Pendant la semaine typique de la saison froide, l'ambiance dans le bâtiment appartient à trois zones : zone d'effet de masse, zone de confort et zone de refroidissement évaporatif direct.

## 2.3 Conclusion

L'approche utilisée dans la mise en évidence de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment est basée sur des simulations numériques. Ainsi, un modèle numérique du bâtiment typique des hautes terres malgaches est obtenu en utilisant le logiciel de simulation dynamique de la performance énergétique du bâtiment "EnergyPlus". Un modèle qualitatif du confort hygrothermique pour les hautes terres malgaches est aussi obtenu. Ce modèle est basé sur l'analyse bioclimatique de la région d'Antananarivo. Une variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type est constatée.

La modification du bâtiment, dans le but de maintenir une ambiance constante, de préférence confortable, ne doit pas être effectuée en optimisant seulement une solution unique, mais aussi en tenant compte des variabilités des différents paramètres qui ont induit la dispersion de cette ambiance.

Le chapitre suivant va nous permettre d'identifier les paramètres dynamiques influents sur le confort hygrothermique à l'intérieur du bâtiment.



## Chapitre 3. Identification des paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type

---

Ce chapitre a pour objectif l'identification des paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment typique des hautes terres malgaches. Pour ce faire, une présentation de l'outil d'identification, l'analyse de sensibilité paramétrique, des paramètres d'entrée d'un modèle et responsables de la variabilité de sa sortie est effectuée. Une approche pour l'application de cette méthode à un modèle simulant la performance énergétique du bâtiment, dont les paramètres d'entrée sont dynamiques et corrélés, est ensuite proposée. Enfin, une méthode pour générer des sollicitations, qui sont les données météorologiques, compatibles à la méthode d'analyse de sensibilité proposée et cohérentes aux données météorologiques du site étudié est présentée.

### 3.1 Méthodologie

---

#### 3.1.1 Analyse de sensibilité

---

Considérons un modèle mathématique dont la structure du système entrées/sortie est décrite par la relation déterministe :

$$y = f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (20)$$

où

$x_1, x_2, \dots, x_p$  : les paramètres d'entrée (aléatoires),

$y$  : la sortie,

$X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$  : le vecteur des entrées,

$Y$  : le vecteur de la sortie.

L'analyse de sensibilité étudie comment la variabilité des paramètres d'entrée  $X$  influent sur celle de la sortie  $Y$ . Les méthodes d'analyse de sensibilité sont groupées en

trois catégories [37] : les méthodes de criblage ou de screening, l'analyse de sensibilité locale et l'analyse de sensibilité globale.

Les méthodes de screening analysent qualitativement l'importance des variables d'entrée sur la variabilité de la sortie du modèle [38] [39] [40] [41]. Ces méthodes permettent d'isoler les paramètres qui sont très influents, ce qui permet par la suite la réduction du nombre de paramètres à analyser. Ces méthodes sont utilisées dans le cas où le modèle comporte un nombre élevé de paramètres d'entrée et requiert un temps de calcul très élevé.

Les méthodes d'analyse de sensibilité locale étudient les variations d'une sortie du modèle suite à une faible variation d'un paramètre d'entrée. A chaque paramètre d'entrée est attribuée une valeur nominale de référence. L'analyse de sensibilité s'effectue en faisant varier la valeur de référence d'un paramètre d'entrée en fixant celles de tous les autres.

Les méthodes dites globales s'intéressent, quant à elles, à la variabilité de la sortie du modèle dans son domaine de variation. Elles étudient comment la variabilité des entrées se répercute sur celle de la sortie tout en déterminant quelle part de variance de la sortie est due à celles des entrées.

Nous appliquons dans cette thèse l'analyse de sensibilité globale qui est basée sur l'analyse de la variance ANOVA.

### 3.1.1.1 Analyse de sensibilité globale

---

Dans un premier temps, nous supposons que :

- les variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$  de la relation (20) sont indépendantes,
- la variance de la sortie  $Y$  est finie.

#### a. Décomposition de Sobol et indices de sensibilité

---

Des indicateurs de sensibilité de la sortie  $Y$  par rapport aux paramètres d'entrée  $X_i$  également appelés indices de Sobol [42] ou indices de premier ordre sont donnés par :

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)} \quad (21)$$

avec

$E(.)$  : l'espérance,

$Var(.)$  : la variance.

Ces indices indiquent la part de variance de  $Y$  imputable aux paramètres  $X_i$ . Les indices du premier ordre représentent les influences directes de la variation des paramètres  $X_i$  sur  $Y$ .

Ces indices sont appréciés en se basant sur la décomposition de  $f(X)$  en une somme de fonctions élémentaires [43] :

$$f(X) = f_0 + \sum_{i=1}^p f_i(X_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq p} f_{ij}(X_i, X_j) + \dots + f_{12\dots p}(X_1, X_2, \dots, X_p) \quad (22)$$

où :

$$f_0 = E[Y],$$

$$f_i(X_i) = E[Y|X_i] - f_0,$$

$$f_{ij}(X_i, X_j) = E[Y|X_i, X_j] - f_i(X_i) - f_j(X_j) - f_0,$$

$$f_{ijk}(X_i, X_j, X_k) = E[Y|X_i, X_j, X_k] - f_i(X_i) - f_j(X_j) - f_k(X_k) - f_0,$$

ou

$$f_0 = E[Y],$$

$$f_i(X_i) = E[Y|X_i] - E[Y],$$

$$f_{ij}(X_i, X_j) = E[Y|X_i, X_j] - E[Y|X_i] - E[Y|X_j] - E[Y],$$

$$f_{ijk}(X_i, X_j, X_k) = E[Y|X_i, X_j, X_k] - E[Y|X_i] - E[Y|X_j] - E[Y|X_k] - E[Y],$$

...

Cette décomposition a été introduite par Sobol.

Les fonctions composantes de cette décomposition satisfont aux conditions suivantes :

$$\int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_k} = 0 \quad \forall k = 1, \dots, s \quad \forall \{i_1, \dots, i_s\} \subseteq \{1, \dots, p\} \quad (23)$$

Cette décomposition est unique du fait que les paramètres d'entrée sont indépendants et que les composantes  $f_{i_1, \dots, i_s}$  de cette décomposition sont orthogonales. En effet, de la relation (23), ces fonctions vérifient les relations suivantes :

$$\int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) * f_{j_1, \dots, j_t}(x_{j_1}, \dots, x_{j_t}) dx = 0 \quad (24)$$

La décomposition (22) est analogue à celle de la variance ANOVA, [44]. Effectivement, la variance  $V$  de  $Y$  peut se décomposer comme suit :

$$V = \sum_{i=1}^p V_i + \sum_{1 \leq i < j \leq p} V_{ij} + \dots + V_{12\dots p} \quad (25)$$

Où :

$$V_i = V(E[Y|X_i]),$$

$$V_{ij} = V(E[Y|X_i, X_j]) - V_i - V_j,$$

$$V_{ijk} = V(E[Y|X_i, X_j, X_k]) - V_i - V_j - V_k,$$

...

En conséquence, la séparation des effets des différentes variables d'entrée faite dans la décomposition de Sobol de la fonction du modèle est bien transmise dans la décomposition de la variance de  $Y$ .

Ainsi :

— Les indices de premier ordre sont donnés par :

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (26)$$

— Les indices de second ordre ou effets d'interaction entre  $X_i$  et  $X_j$  sont donnés par :

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V(Y)} = \frac{V(E[Y|X_i, X_j]) - V_i - V_j}{V(Y)} \quad (27)$$

Ces indices expriment la sensibilité de la variance de  $Y$  due à l'interaction des variables  $X_i$  et  $X_j$  sans prendre en compte des effets des variables seules.

— Les indices de sensibilité d'ordre trois peuvent être définis par :

$$S_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{V(Y)} = \frac{V(E[Y|X_i, X_j, X_k]) - V_i - V_j - V_k}{V(Y)} \quad (28)$$

Ces indices expriment la sensibilité de la variance de  $Y$  due aux variables  $X_i, X_j$  et  $X_k$  sans tenir compte des effets des variables seules.

— Les indices d'ordre supérieur sont exprimés avec le même principe.

L'interprétation de ces indices est facile, étant donné que leur somme est égale à 1 et leurs valeurs sont toujours positives. Plus l'indice est grand, plus la variable a de l'importance.

Le nombre d'indices de sensibilité, d'ordre 1 à  $p$ , pour  $p$  variables est de  $2^p - 1$ . Lorsque le nombre de paramètres d'entrée  $p$  est important, le nombre d'indices de sensibilité explose. L'estimation et l'interprétation de ces indices deviennent dans ce cas plus difficiles.

Par ailleurs, les indices de sensibilité totaux introduits par Homma et Al [45] expriment la sensibilité totale de la variance de  $Y$  aux paramètres. Ces indices indiquent la sensibilité due à ces paramètres sous toutes leurs formes.

Les effets totaux des paramètres  $X_i$  noté  $ST_i$  sont donnés par :

$$ST_i = \sum_{i \in u_i \subseteq \{1, 2, \dots, n\}} S_{u_i} \quad (29)$$

Pour  $p$  paramètres, il y a  $p$  indices de sensibilité totaux. L'utilisation et l'interprétation des indices de sensibilité totaux sont plus simples à cause de leur nombre assez faible.

Ces indices de sensibilité, indices de Sobol et indices de sensibilité totaux sont utilisés dans la suite de cette thèse.

b. Estimation des indices de sensibilité :

---

1. Méthode de Sobol

---

Pour des modèles relativement simples, les indices de Sobol sont calculés de façon analytique. Dans le cas des modèles complexes ou de type boîte noire, ces indices sont estimés, habituellement, par la méthode de Monté Carlo ou méthode de Sobol.

i. Base de la méthode

---

Souvent, on est amené à calculer une intégrale du type :

$$I = \int_{\mathbb{R}^p} g(X) * f(X) dX = \int_{\mathbb{R}^p} g(X_1, \dots, X_p) * f(X_1, \dots, X_p) dX_1, \dots, X_p \quad (30)$$

avec

$$f \text{ positive et } \int_{\mathbb{R}^p} f(X) dX = 1,$$

alors, pour un échantillon construits à partir de  $N$  échantillons aléatoires uniformes sur  $\mathbb{R}^p$  de  $(X_1, \dots, X_p)$ ,  $I = E(g(X))$ .

Ainsi,  $I$  peut être approché par :

$$\hat{I}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(X_i) \quad (31)$$

Le taux de convergence de la méthode est estimé à l'aide du théorème central-limite qui garantit que :

$$\frac{\sqrt{N}}{\sigma} (\hat{I}_N - I) \xrightarrow{\mathcal{L}} \mathcal{N}(0,1),$$

si  $g(X)$  est de variance finie  $\sigma$ .

À partir de la relation (20) définissant le modèle, pour cet échantillon de réalisation des variables d'entrée, on a la relation matricielle suivante :

$$f \left( \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j,1} & \cdots & x_{j,i} & \cdots & x_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,i} & \cdots & x_{N,p} \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_j \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (32)$$

L'espérance de  $Y$ ,  $E[Y] = f_0$ , et sa variance,  $V(Y) = V$ , sont estimées par :

$$\hat{f}_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k \quad (33)$$

$$\hat{V} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k^2 - \hat{f}_0^2 \quad (34)$$

L'estimation des indices de sensibilité requiert l'estimation de l'espérance de variance conditionnelle. Nous présentons ici un aperçu d'une technique d'estimation développé par Saltelli et al, [46].

D'après (21),

$$V_i = V(E[Y|X_i])$$

$$V_i = E[E[Y|X_i]^2] - E[E[Y|X_i]]^2$$

$$V_i = E[E[Y|X_i]^2] - \hat{f}_0^2$$

La méthode consiste à estimer la quantité  $E[E[Y|X_i]^2]$ , qui est l'espérance du carré de l'espérance de  $Y$  conditionnellement à  $X_i$ , comme une espérance classique, mais en prenant compte du conditionnement à  $X_i$  en faisant varier dans les deux appels à  $f$  toutes variables sauf  $X_i$ .

Pour ce faire, deux matrices A et B d'échantillons  $N \times p$ , dont les éléments sont  $a_{ji}$  et  $b_{ji}$ , sont générées. À partir de ces deux matrices, des matrices  $Ab^{(i)}$  sont construites telles que toutes les colonnes proviennent de A sauf la  $i$ -ème colonne qui est prise dans B. De la même manière, des matrices  $Ba^{(i)}$  sont construites telles que toutes les colonnes proviennent de B exceptée la  $i$ -ème colonne qui est prise dans A.

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,i} & \cdots & a_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{j,1} & \cdots & a_{j,i} & \cdots & a_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N,1} & \cdots & a_{N,i} & \cdots & a_{N,p} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,i} & \cdots & b_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{j,1} & \cdots & b_{j,i} & \cdots & b_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N,1} & \cdots & b_{N,i} & \cdots & b_{N,p} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$Ab^{(i)} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & b_{1,i} & \cdots & a_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{j,1} & \cdots & b_{j,i} & \cdots & a_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N,1} & \cdots & b_{N,i} & \cdots & a_{N,p} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$Ba^{(i)} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & a_{1,i} & \cdots & b_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{j,1} & \cdots & a_{j,i} & \cdots & b_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N,1} & \cdots & a_{N,i} & \cdots & b_{N,p} \end{bmatrix} \quad (38)$$

À partir du couple de matrices A et  $Ba^{(i)}$  ou bien B et  $Ab^{(i)}$ , les quantités  $E[E[Y|X_i]^2]$  peuvent être estimées, [42] :

$$E[E[Y|X_i]^2] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(A)_j f(Ba^{(i)})_j \quad (39)$$

ainsi :

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(A)_j f(Ba^{(i)})_j - \hat{f}_0^2 \quad (40)$$



Saltelli et al [46] ont proposé une amélioration de cet estimateur :

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f^{(B)}_j (f(Ab^t)_j - f(A)_j) \quad (41)$$

$V_{ij}$  peut être estimé de la même manière et ainsi de suite.

L'estimation de tous les indices de sensibilité requiert  $N \times (2p + 1)$  appels à la fonction, ce qui est très coûteux en nombre de simulations donc en temps de calcul.

La méthode de Sobol est basée sur la décomposition de la variance et est utilisée pour le calcul des indices de sensibilité. L'ensemble des paramètres d'entrée est couvert et le modèle complet est utilisé pour l'estimation des variances totales et partielles. Un inconvénient important de la méthode de Sobol est son nombre élevé de passages du modèle requis, parce que pour chaque estimation (par exemple, chaque premier ordre d'indice de sensibilité  $S_i$ ) un ensemble différent d'échantillons est nécessaire.

## 2. La méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) [47]

---

Le calcul de la moyenne ou de la variance d'une sortie d'un modèle revient à calculer une intégrale multiple. L'idée de la méthode FAST consiste à ramener ce calcul en une intégrale simple par une transformation de variables sur les facteurs. Ces transformations sont des fonctions périodiques spécifiques à chaque facteur. Tout point de l'espace des facteurs doit pouvoir être atteint par l'intermédiaire de ces transformations. Le remplissage de l'espace est ainsi assuré.

### i. Transformation des facteurs

---

Soit un modèle défini par la relation (20),

Avec  $X_i$  les variables standardisées c'est-à-dire appartenant dans l'intervalle  $[-1,1]$ .

On effectue le changement de variable suivant :

$$X_i = \sin(\omega_i s) \quad (42)$$

Où  $s \in [0, 2\pi]$ .

On peut montrer facilement que tout point de l'espace des facteurs peut être atteint si les fréquences  $\omega_i$  sont incommensurables, i.e. si aucune des fréquences n'est une combinaison linéaire à coefficients entiers des autres fréquences.

ii. Décomposition en série de Fourier

---

En utilisant le changement de variable défini auparavant, on a :

$$Y = f(\sin(\omega_1 s), \dots, \sin(\omega_i s), \dots, \sin(\omega_n s)) = G(s) \quad (42)$$

La décomposition en série de Fourier de cette fonction est alors :

$$Y = G(s) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \{A_l \cos(ls) + B_l \sin(ls)\} \quad (43)$$

Avec

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} G(t) * \cos(lt) dt \quad (44)$$

Et

$$B_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} G(t) * \sin(lt) dt \quad (45)$$

Il est aisé de vérifier que :

$$E(Y) = A_0 \quad (46)$$

De plus, en utilisant l'orthogonalité des termes de la série de Fourier, on montre que :

$$V(Y) = 2 \sum_l \{A_l^2 + B_l^2\} \quad (47)$$

iii. Détermination de l'effet d'un facteur

A la variation de  $X_i$ , on associe les termes de la décomposition de Fourier de  $G(s)$  qui sont de la forme :

$$A_{\omega_i s} \cos(\omega_i p s) + B_{\omega_i s} \sin(\omega_i p s)$$

Avec  $p$  varie de  $-\infty$  à  $+\infty$ .

Ces termes sont distincts de ceux associés aux autres facteurs du fait de l'incommensurabilité des fréquences.

La variance qui caractérise l'effet principal du facteur  $X_i$  est donnée par la relation :

$$D_{\omega_i} = 2 \sum_{p=1}^{\infty} A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2 \quad (48)$$

L'indice principal du facteur  $X_i$  est donné par :

$$S_i = \frac{D_{\omega_i}}{V(Y)} \quad (49)$$

$D_{\omega_i}$  est estimé à l'aide des  $M$  termes, soit :

$$\hat{D}_{\omega_i} = 2 \sum_{p=1}^M A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2 \quad (50)$$

Ce qui nécessite le calcul des coefficients  $A_0, A_{\omega_i}, \dots, A_{M\omega_i}$  et  $B_{\omega_i}, \dots, B_{M\omega_i}$ , soit :

$$N_f = (2M\omega_i + 1) \text{ termes}$$

$N_f$  est le nombre minimal de fréquences que l'on va utiliser. En pratique  $M = 6$ , au maximum.

Cette procédure est répétée pour chaque facteur de la fonction associée au modèle. L'estimation des intégrales associées aux coefficients  $A$  et  $B$  est obtenue en discrétisant le domaine d'intégration en  $N_f$  points. Si on a  $K$  facteurs, la mise en œuvre de FAST nécessite au total  $K \times N_f = 2M(\omega_{max} + 1)$  exécutions de la fonction,  $\omega_{max}$  désignant la fréquence maximale affectée aux facteurs.

Un des avantages de la méthode FAST est que les indices de sensibilité peuvent être obtenus indépendamment les uns des autres, à partir d'un même échantillon de simulations, ce que ne permet pas la méthode de Sobol qui nécessite deux échantillons. Par contre, la méthode de Sobol étant stochastique, elle permet d'obtenir un intervalle de confiance sur les estimations d'indices, ce que ne permet pas FAST, puisque pour une série de fréquences donnée, les estimations d'indices sont déterministes.

Après avoir examiné les méthodes traditionnelles d'analyse de sensibilité globale, il faut des méthodes générales pour l'analyse des réponses non-linéaires et interactions de paramètres dans le domaine de l'ingénierie de l'environnement et de la sûreté. Ces méthodes, qui sont efficaces en calcul, peuvent gérer un grand nombre de paramètres d'entrée en même temps. Les méthodes traditionnelles ne peuvent pas remplir toutes ces exigences. La méthode la plus récemment développée, qui consiste à approximer le modèle en un métamodèle, fournit une approche prometteuse pour faire face à une grande dimension de l'espace d'entrée très efficace. La méthode produit une cartographie détaillée de l'espace des paramètres d'entrée aux sorties sélectionnées et est fondamentale pour l'analyse de sensibilité globale. Les indices de sensibilité peuvent être calculés de manière automatique et sont ensuite utilisables directement dans le classement de l'importance et dans l'exploration des interactions des paramètres.

### 3.1.1.2 Métamodèle et analyse de sensibilité

---

En général, l'analyse de sensibilité essaie de révéler la relation entre les entrées du modèle et ses sorties. Cela se fait habituellement par des méthodes de Monte Carlo ou des approches fondées sur la variance décrites précédemment. Ces méthodes visent à déduire la contribution des paramètres d'entrée aux incertitudes des sorties.

Une autre approche est de produire une cartographie détaillée de la sortie dans l'espace des paramètres d'entrée. Sans aucune simplification, l'identification de la relation entrées-sortie d'un système avec des entrées de grande dimension serait très coûteuse en temps de calcul. La méthode basée sur le métamodèle introduite par Murata et al [48] [49] peut réduire considérablement le temps de calcul nécessaire à la mise en correspondance et est essentiellement mis au point pour exprimer la relation d'entrées-sortie d'un modèle complexe avec un grand nombre de paramètres d'entrée.

La construction d'un métamodèle ou décomposition du modèle en une somme de fonctions de dimension croissante *High Dimensional Model Representation*, [42] (*HDMR*), comme le développement en polynômes de chaos, consiste à séparer les effets des différents paramètres qui sont transmis dans la décomposition de la variance.

Dans cette thèse, nous utilisons le développement en polynômes de chaos ou *Polynomials Chaos Expansion* (PCE) [50] [51] pour approximer le modèle afin de faire l'analyse de sensibilité.

#### a. PCE (*Polynomials Chaos Expansion*)

---

Le développement en polynômes de chaos vient de la théorie du chaos homogène [52].

La variance de  $Y$  dans la relation (20) est supposée finie et les paramètres d'entrée  $X_1, X_2, \dots, X_p$  sont indépendants.

En se basant sur le travail de Wiener, Cameron&Martin [53] ont montré que  $y = f(X)$  peut être approximée en une série de la forme suivante :

$$y = \sum_{j=1}^{\infty} a_j \Phi_j(X) \quad (51)$$

avec

$a_j$  : les coefficients du polynôme de chaos,

$\Phi_j$  : les polynômes multi-variables dépendants de  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  qui sont des produits tensoriels des polynômes unidimensionnels  $\phi_{a_k^j}(x_k)$ .

$$\Phi_j(X) = \prod_{k=1}^n \phi_{\alpha_k^j}(x_k) \quad (52)$$

$\alpha_k^j$  : le degré de  $\phi_{\alpha_k^j}(x_k)$

Le degré de  $\Phi_j$  ne dépasse pas  $p$  de façon à vérifier la relation suivante :

$$\alpha^j = \sum_{k=1}^n \alpha_k^j \leq p \quad (53)$$

1. Les polynômes unidimensionnels et les paramètres

L'unicité de la décomposition est assurée par l'utilisation des  $\phi_{\alpha_k^j}$  correspondant à la distribution de  $x_k$  [54]. En effet, des correspondances entre des familles de lois de probabilité et des familles de polynômes orthogonaux ont été établies :

**Tableau 3-1. Correspondance entre famille de loi de probabilité et polynôme orthogonal**

Distribution	Polynôme
Uniforme	Legendre
Gaussienne	Hermite
Gama	Laguerre
Beta	Jacobi

Dans ce travail, les distributions des sollicitations sont transformées en des distributions normales, ainsi les polynômes de Hermite sont utilisés :

$$\begin{aligned}
 \phi_0(x) &= 1 \\
 \phi_1(x) &= x \\
 \phi_2(x) &= x^2 - 1 \\
 \phi_3(x) &= 3x^3 - x \\
 \phi_4(x) &= 3x^4 - 6x^2 + 3
 \end{aligned} \quad (54)$$

En pratique, le développement est arrêté à l'ordre  $M$

$$y = \sum_{j=0}^M a_j \Phi_j(X) \quad (55)$$

tel que

$$M + 1 = \frac{(n + p)!}{n! p!} \quad (56)$$

i. Transformation de Nataf

---

La transformation Nataf [55] [56] [57] permet la transformation de l'espace d'origine en une normale standardisée mutuellement indépendante. Elle ne nécessite pas la fonction de densité de probabilité conjointe des paramètres. Cependant, la densité de probabilité marginale de chaque paramètre doit être connue. Cette transformation consiste en la renormalisation de chaque variable qui n'est pas normale :

$$z_i = \Psi^{-1}(H_i(x_i)) \quad (57)$$

$\Psi^{-1}$  : la fonction de distribution inverse de la distribution normale,

$H_i$  : la densité de probabilité marginale de chaque paramètre.

ii. Développement de Cornish-Fisher

---

La transformation de Nataf nécessite la connaissance de la fonction de distribution marginale de chaque paramètre, ce qui n'est pas toujours possible surtout concernant les paramètres météorologiques.

Pour contourner ce problème, nous proposons la méthode utilisée par Sabra Hamza et all [58]. Cette méthode repose sur le développement de Cornish-Fisher.

Comme ce développement s'applique seulement aux variables centrées réduites qui suivent une loi proche de la normale, le changement de variable suivant est fait pour chaque entrée  $x_i$  :

$$x_{si} = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (58)$$

où

$\mu_i$  : la moyenne de  $X_i$ ,

$\sigma_i$  : l'écart type de  $X_i$ .

La transformation de  $x_i$  en  $z_i$  est faite en appliquant le développement de Cornish-Fisher. Ce développement tient compte les moments d'ordre 3 et 4 :

$$\begin{aligned}
 z_i = & x_{si} - \frac{1}{6}\beta_3(x_{si}^2 - 1) - \frac{1}{24}(\beta_4 - 3)(x_{si}^3 - 3x_{si}) \\
 & + \frac{1}{36}\beta_3^2(4x_{si}^3 - 7x_{si}) + \frac{1}{144}\beta_3(\beta_4 - 3)(11x_{si}^4 - 42x_{si}^2 + 15) \\
 & - \frac{1}{648}\beta_3^3(69x_{si}^4 - 187x_{si}^2 + 52) + \frac{1}{384}(\beta_4 - 3)^2(5x_{si}^5 - 32x_{si}^3 - 35x_{si}) \\
 & - \frac{1}{864}\beta_3^2(\beta_4 - 3)(111x_{si}^5 - 547x_{si}^3 - 456x_{si}) \\
 & + \frac{1}{7776}\beta_3^4(948x_{si}^5 - 3628x_{si}^3 - 2473x_{si})
 \end{aligned} \tag{59}$$

avec

$\beta_3$  : le moment d'ordre 3,

$\beta_4$  : le moment d'ordre 4.

Après cette transformation, comme les entrées sont considérées indépendantes, les indices de sensibilité peuvent être obtenus par la décomposition en PC :

$$y = \sum_{j=1}^{\infty} a_j \Phi_j(Z) \tag{60}$$

et

$$\Phi_j(Z) = \prod_{k=1}^n \phi_{\alpha_k^j}(z_k) \tag{61}$$



## 2. Détermination des coefficients de PC

Plusieurs méthodes ont été développées pour déterminer les coefficients modaux. Ces méthodes sont classées en deux catégories :

- les méthodes intrusives [49] [59] : le calcul des coefficients de PC est introduit directement dans le modèle numérique
- les méthodes non-intrusives [60] [61] [62] [63] [64] : le calcul des coefficients de PC se fait en considérant le modèle comme une boîte noire.

Nous nous intéressons dans cette thèse aux méthodes non-intrusives, plus particulièrement, la méthode de régression. Cette méthode cherche à minimiser l'erreur  $\varepsilon$  définie par :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_j \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j,1} & \cdots & x_{j,i} & \cdots & x_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,i} & \cdots & x_{N,p} \end{bmatrix} - \sum_{k=1}^M a_k \Phi_k \begin{bmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,i} & \cdots & z_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{j,1} & \cdots & z_{j,i} & \cdots & z_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N,1} & \cdots & z_{N,i} & \cdots & z_{N,p} \end{bmatrix} \quad (62)$$

La minimisation au sens du moindre carré revient à résoudre l'équation :

$$\varphi = \operatorname{argmin} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varepsilon_j^2 \quad (63)$$

en notant :

$$f \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j,1} & \cdots & x_{j,i} & \cdots & x_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,i} & \cdots & x_{N,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_j \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = Y,$$

$$\Phi_k \begin{bmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,i} & \cdots & z_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{j,1} & \cdots & z_{j,i} & \cdots & z_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N,1} & \cdots & z_{N,i} & \cdots & z_{N,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{k1} \\ \vdots \\ \Phi_{kj} \\ \vdots \\ \Phi_{kN} \end{bmatrix} = \Phi_k,$$

$\Phi = [\Phi_1, \dots, \Phi_k, \dots, \Phi_M]$ , et

$a = [a_1, \dots, a_k, \dots, a_M]^T$ ,

la solution de l'équation ... s'écrit comme suit :

$$a = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (64)$$

b. Indices de sensibilité (paramètres indépendants)

---

Après la détermination des composants du PC, la sortie  $y = \sum_{j=0}^M a_j \Phi_j(Z)$  peut être réorganisée pour avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} y &= a_0 \\ &+ \sum_{k=1}^n \sum_{j \in \Gamma_k} a_j \Phi_j(z_k) \\ &+ \sum_{1 \leq k_1 \leq k_2 \leq n} \sum_{j \in \Gamma_{k_1, k_2}} a_j \Phi_j(z_{k_1}, z_{k_2}) \\ &+ \dots \\ &+ \sum_{j \in \Gamma_{1, \dots, M}} a_j \Phi_j(z_{k_1}, \dots, z_M) \end{aligned} \quad (65)$$

avec

$\Gamma_{k_1, \dots, k_s}$  : l'ensemble des multi-indices  $j$  qui correspondent aux polynômes dépendant uniquement des variables  $x_{k_1}, \dots, x_{k_s}$ .

Ainsi, l'indice de premier ordre ou effet principal d'un paramètre  $x_i$  ( $\sim z_i$ ) est estimé par :

$$S_i = \frac{\sum_{j \in \Gamma_i} a_j^2 E(\Phi_j^2(z_i))}{\sum_{j=1}^M a_j^2 E(\Phi_j^2(Z))} \quad (66)$$

$\Gamma_i$  : l'ensemble de polynômes  $\Phi_j$  dépendant uniquement de  $z_i$ .

L'indice de second ordre ou effet d'interaction entre  $x_i, x_l$  ( $\sim z_i, z_l$ ) par :

$$S_{il} = \frac{\sum_{j \in \Gamma_{il}} a_j^2 E(\Phi_j^2(z_i, z_l))}{\sum_{j=1}^M a_j^2 E(\Phi_j^2(Z))} \quad (67)$$

Et l'effet total d'un paramètre  $x_i$  ( $\sim z_i$ ) noté  $ST_i$  est donné par :

$$S_{Ti} = \frac{\sum_{j \in \Gamma_{i+}} a_j^2 E(\Phi_j^2(z_i))}{\sum_{j=1}^M a_j^2 E(\Phi_j^2(Z))} \quad (68)$$

### c. Indices de sensibilité pour des paramètres dépendants

Pour des entrées dépendantes, Mara et Tarantola [65] ont proposé de décorréler les variables. Pour ce faire, la méthode d'orthogonalisation de Gram Shmidt est utilisée.

Soit  $C$  la matrice de corrélation des variables d'entrées.  $C$  peut être approximée en une matrice définie positivement [65], ainsi  $C$  peut s'écrire :

$$C = PP^T \quad (69)$$

$P$  : la matrice du triangle inférieur obtenue par la transformation de Cholesky de  $C$ .

Les variables décorrélées  $U$ , à partir des variables normales  $Z$ , sont obtenues par :

$$U = ZP^{-1} \quad (70)$$

À partir de  $U$ , les indices de sensibilité peuvent être estimés en utilisant le PCE :

$$y = \sum_{j=1}^{\infty} a_j \Phi_j(U) \quad (71)$$

et

$$\Phi_j(Z) = \prod_{k=1}^p \phi_{\alpha_k^j}(u_k) \quad (72)$$

Il est important de noter que :

- $u_1$  est proportionnelle à  $z_1$  donc équivalente à  $x_1$
- $u_2$  est une combinaison linéaire de  $z_1$  et  $z_2$  mais n'est plus corrélée à  $u_1$
- $u_3$  est une combinaison linéaire de  $z_1, z_2$  et  $z_3$  mais n'est plus corrélée à  $u_1$  et  $u_2$
- ...
- $u_p$  est une combinaison linéaire de  $z_1, z_2, \dots, z_p$  mais n'est plus corrélée aux autres paramètres.

Les indices de sensibilité sont donnés par les relations suivantes :

$$S_i = \frac{\sum_{j \in \Gamma_i} a_j^2 E(\Phi_j^2(u_i))}{\sum_{j=1}^M a_j^2 E(\Phi_j^2(U))} \quad (73)$$

$$S_{il} = \frac{\sum_{j \in \Gamma_{il}} a_j^2 E(\Phi_j^2(u_i, u_l))}{\sum_{j=1}^M a_j^2 E(\Phi_j^2(U))} \quad (74)$$

$$S_{Ti} = \frac{\sum_{j \in \Gamma_{i+}} a_j^2 E(\Phi_j^2(u_i))}{\sum_{j=1}^M a_j^2 E(\Phi_j^2(U))} \quad (75)$$

Compte tenu des remarques précédentes, concernant les variables transformées  $U$ :

- $(S_1, ST_1)$  : le rapport de corrélation et l'effet total de  $u_1$  qui sont ceux de  $x_1$ , ou contributions marginale et totale de  $x_1$  à la variance de  $y$ ,
- $(S_2, ST_2)$  ou  $(S_{2-1}, ST_{2-1})$  : le rapport de corrélation et l'effet total de  $u_2$  qui sont ceux de  $x_2$  sans sa contribution en corrélation avec  $x_1$ ,
- ...
- $(S_p, ST_p)$  ou  $(S_{up}, ST_{up})$  : le rapport de corrélation et l'effet total de  $u_n$  qui sont ceux de  $x_n$  sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres.

Les indices de sensibilité ainsi définis sont interprétés en raison de leur ordre dans l'ensemble. En effet, la discussion qui précède est vraie pour l'ordre canonique, ( $X = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ ). Les nouveaux indices de sensibilité pour un ordre différent sont interprétés de la même façon. Par exemple, les indices avec l'ensemble  $\{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ ,  $(S_2, ST_2)$  et  $(S_{u1}, ST_{u1})$ , entre autres, peuvent être calculés. L'ensemble complet  $(S_i, ST_i)$  et  $(S_{ui}, ST_{ui})$  peut être calculé en permutant circulairement les paramètres avant la décorrélation.

### 3.1.1.3 Synthèse de la méthode

---

L'approche proposée, pour l'analyse de sensibilité, se résume comme suit :

- Obtention des variables centrées réduites  $X_{si}$ ,
- Calcul des moments d'ordre 3 et 4 :  $\beta_3, \beta_4$ ,
- Application de l'approximation de Cornish-Fisher,
  - si les entrées sont considérées comme indépendantes :
    - Développement en PC,
    - Estimation des indices de sensibilité,
  - sinon,
    - Décorrélation des entrées,
    - Développement en PC.
- Estimation des indices de sensibilité.

### 3.1.2 Les données météorologiques

---

#### 3.1.2.1 Approche utilisée pour l'échantillonnage des données météorologiques

---

L'analyse de sensibilité du confort hygrothermique avec des paramètres météorologiques nécessite l'échantillonnage de chaque paramètre. Cet échantillonnage est effectué en reproduisant, pour chaque simulation, des variations sur les données météorologiques, ceci afin d'induire une variance pour chaque sollicitation. Ces échantillons doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- Ils doivent répondre aux exigences de la méthode d'analyse de sensibilité appliquée,
- Ils doivent être cohérents avec les données météorologiques du site.

La méthode d'analyse de sensibilité que nous utilisons dans cette thèse est basée sur l'approche probabiliste, c'est-à-dire que les paramètres sont représentés par des variables aléatoires de loi stochastique. L'utilisation de cette approche nécessite la définition des densités de probabilité de chaque paramètre et comporte deux étapes :

- Évaluation des densités de probabilité des paramètres d'entrée : l'estimation des densités de probabilité est effectuée en utilisant des techniques d'estimation statistique ou en faisant des jugements d'expert. La première technique consiste en l'utilisation des techniques d'estimation statistique à partir des données disponibles ou en utilisant un échantillon informatif. La deuxième technique est utilisée dans le cas où les données disponibles sont limitées. Dans ce cas, une distribution normale est utilisée si un seul échantillon de valeurs possibles pour une entrée est disponible, mais qu'aucune valeur préférentielle susceptible de se produire n'est favorisée.
- L'échantillonnage des paramètres : cette étape dépend des densités de probabilité des paramètres d'entrée. Effectivement, l'échantillonnage doit permettre la propagation des incertitudes des paramètres dans le modèle et la caractérisation de la variabilité que ces incertitudes ont induites dans la sortie du modèle.

Afin de respecter la cohérence des échantillons avec les données météorologiques du site, les caractéristiques statistiques des données (l'auto-corrélation de chaque variable et la corrélation entre les variables) doivent être induites dans les échantillons :

- L'auto-corrélation : elle met en évidence la relation de la série avec elle-même en introduisant le décalage entre deux échantillons. Dans cette thèse, nous faisons l'hypothèse que cette corrélation diminue au fur et à mesure que le décalage augmente. En effet, en prenant l'exemple de la température, la dépendance entre la température de 7h et de 8h est plus importante que celle entre 7h et 12h. On définit la fonction d'auto-corrélation comme étant la fonction qui fait correspondre au décalage l'auto-corrélation correspondante.

- La corrélation : elle définit la dépendance entre deux variables d'entrée. Effectivement, les données climatiques sont fortement corrélées.

#### a. Echantillonnage des sollicitations

---

L'échantillonnage est le processus par lequel les valeurs sont tirées au hasard selon les distributions de probabilité des variables d'entrée. L'échantillonnage dans une simulation est effectué de façon répétitive avec un échantillon prélevé à partir de chaque distribution de probabilité d'entrée. Avec suffisamment d'itérations, les valeurs échantillonnées pour une distribution de probabilité se répartissent de façon à ce qu'elles correspondent approximativement à la distribution de probabilité d'entrée connue.

Les statisticiens et les praticiens ont développé plusieurs techniques pour prélever des échantillons aléatoires. Le facteur important à examiner lors de l'évaluation des techniques d'échantillonnage est le nombre d'itérations nécessaires pour recréer précisément une distribution en entrée par échantillonnage. Des résultats précis pour les distributions de sortie dépendent d'un échantillonnage complet des distributions d'entrée. Si une méthode d'échantillonnage nécessite plusieurs itérations et plus temps de simulation que une autre pour se rapprocher des distributions d'entrée, la méthode est moins «efficace».

#### 1. Méthode de Monté Carlo

---

L'échantillonnage de Monte Carlo se réfère à la technique traditionnelle pour l'utilisation de nombres aléatoires ou pseudo-aléatoires pour échantillonner à partir d'une distribution de probabilité. Aujourd'hui, les techniques de Monte Carlo sont appliquées à une grande variété de problèmes complexes impliquant le comportement aléatoire. Une grande variété d'algorithmes est disponible pour générer des échantillons aléatoires de différents types de distribution de probabilité.

La méthode se résume comme suit :

- Générer un échantillon de taille  $N$  des variables d'entrée  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$  à partir de leur densité de probabilité,
- Evaluer la sortie du modèle pour chaque jeu de variables  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$ ,
- Calculer les données statistiques de la distribution de la sortie : moyenne, variance, fonction de distribution ...

La mise en œuvre de la méthode de Monte Carlo est facile. En effet, la méthode considère le modèle comme une boîte noire, alors ne modifie pas le code de calcul. Cependant, elle est très coûteuse en temps de calcul puisqu'elle nécessite un nombre élevé d'échantillons pour respecter les caractéristiques statistiques du modèle.

## 2. Latin Hypercube Sampling [66]

---

L'échantillonnage par Hypercube Latin est un développement assez récent dans la technique d'échantillonnage et est conçu pour recréer avec précision la distribution d'entrée grâce à un échantillonnage en moins d'itérations par rapport à la méthode de Monte Carlo. La clé du LHS est la stratification des distributions de probabilité d'entrée. La stratification divise la courbe cumulative dans des intervalles égaux sur l'échelle de probabilité cumulative. Un échantillon est ensuite prélevé au hasard dans chaque intervalle ou "stratification" de la distribution d'entrée. L'échantillonnage est forcé pour représenter les valeurs dans chaque intervalle, et par conséquent, pour recréer la distribution de probabilité d'entrée.

Pour apprécier pleinement la valeur de la structure sous-jacente de LHS, il est utile de se familiariser avec des modèles informatiques utilisés dans des applications réelles. De tels modèles sont généralement caractérisés par un grand nombre de variables d'entrée (même jusqu'à quelques centaines) et le plus souvent, seule une poignée de ces entrées sont importantes pour une réponse donnée. En outre, la réponse du modèle à variables multiples est souvent fonction du temps. Si les valeurs d'entrée sont basées sur un plan factoriel, chaque niveau de chaque facteur est répété plusieurs fois. En outre, l'expérimentateur a généralement une réponse particulière à l'esprit lors de la construction du plan factoriel et cette conception peut être totalement inefficace avec des réponses multiples. D'autre part, LHS assure que toute la plage de chaque variable d'entrée est complètement explorée sans tenir compte de la variable unique ou de la



combinaison de variables peut dominer la réponse d'un modèle informatique. Cela signifie qu'un seul échantillon fournit des informations utiles lorsque certaines variables d'entrée dominent certaines réponses (ou certains intervalles de temps) tandis que d'autres variables d'entrée dominent d'autres réponses (ou intervalles de temps). En échantillonnant sur toute la gamme, chaque variable a la possibilité de devenir aussi importante, si elle est effectivement importante.

La méthode se résume comme suit :

- La fonction de répartition de chaque variable d'entrée est divisée en  $N$  intervalles équidistants ( $N$  étant le nombre d'échantillons voulus)
- Un échantillonnage aléatoire est effectué, une seule fois, dans chacun de ses sous-intervalles. De cette façon, toute la gamme de variation du paramètre est sillonnée.  $N$  valeurs pour chaque paramètre affectées d'un nombre qui correspond au numéro du sous-intervalle, sont ainsi obtenues. Pour donner un nouvel ordre de l'échantillon, une permutation de ces numéros est faite.
- Les valeurs ainsi obtenues pour chaque variable sont alors associées à l'ordre pour avoir un échantillon des variables d'entrée  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$ .

b. Induction des corrélations et/ou des auto-corrélations dans les échantillons [67]

---

Cette méthode basée sur les corrélations de rang est destinée à induire la dépendance de rang désiré parmi les variables d'entrée. Le procédé présente les propriétés souhaitables suivantes :

- Cette méthode peut être utilisée sans difficulté pour tout type de fonction de distribution d'entrée,
- Elle est simple. Aucune technique mathématique inhabituelle n'est nécessaire pour mettre en œuvre la méthode.

Elle s'applique lorsque:

- Le plan d'échantillonnage pour lequel la corrélation entre les variables d'entrée peut logiquement être considéré, tout en le préservant (comme pour les échantillonnages par hypercube latin)
- Les distributions marginales restent intactes.

Méthode :

Supposons que nous disposons d'un échantillon de variables aléatoires indépendantes :

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j,1} & \cdots & x_{j,i} & \cdots & x_{j,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,i} & \cdots & x_{N,p} \end{bmatrix} \quad (76)$$

Soit :

$$C = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \cdots & \rho_{1,i} & \cdots & \rho_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{i,1} & \cdots & \rho_{i,i} & \cdots & \rho_{i,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p,1} & \cdots & \rho_{p,i} & \cdots & \rho_{p,p} \end{bmatrix} \quad (77)$$

$C$  indique la matrice de corrélation voulue après quelques transformations de  $X$ .

Comme  $C$  est définie positive (dans le cas contraire,  $C$  peut être approximée en sa matrice définie positive la plus proche [68] ), elle peut être écrite, après avoir effectué la transformation de Cholesky [69] :

$$C = PP' \quad (78)$$

avec  $P$  la matrice triangulaire inférieure.

Soit  $R$  une  $N \times p$  matrice dont les colonnes représentent  $p$  permutations indépendantes des valeurs arbitraires ou scores  $\{a(i)\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ .

Dans cette thèse, nous utilisons les scores de Van Der Waerden :

$$\psi^{-1}\left(\frac{1}{N+1}\right)$$

$\Psi^{-1}$  : la fonction inverse de la fonction de distribution normale.

Les éléments de chaque ligne  $R_i$  de  $R$  sont indépendantes et ont la même probabilité.

Le vecteur obtenu après multiplication de  $R_i$  par  $P'$  est  $(R_i P')$  ayant comme matrice de corrélation  $C$ .

Pour la totalité de la matrice  $R$ , nous obtenons :

$$R^* = R P' \quad (79)$$

Chaque ligne de  $R^*$  a la même distribution que  $R_i P'$ . Et la matrice de corrélation de rang  $M$  de  $R^*$  est très proche de  $C$ .

Pour que la matrice de corrélation de rang de  $X$  soit proche de  $C$ , les éléments de chaque colonne  $X_i$  de  $X$  sont réarrangés de façon à ce qu'ils aient le même ordre que celui de la colonne  $R_i^*$  de  $R$ . Ainsi, la matrice de corrélation de rang de  $X$  est la même que celle de  $R^*$  soit  $C$ .

### 3.1.2.2 Application de la méthode aux données météorologiques

---

#### a. Conditions de création des données météorologiques

---

Comme nous l'avons expliqué précédemment, les échantillons créés doivent satisfaire aux conditions et aux exigences de la méthode d'analyse de sensibilité appliquée et, aussi, être cohérents avec les données météorologiques du site.

Rappelons que :

- La méthode d'analyse de sensibilité appliquée requiert la connaissance ou la définition des densités de probabilité des paramètres d'entrée.
- La cohérence des échantillons avec les données météorologiques du site nécessite l'évaluation des caractéristiques statistiques de ces dernières.

Dans les deux cas, la disponibilité des observations météorologiques reste une barrière incontournable, en particulier pour le cas de Madagascar. En effet, des données mesurées au pas de temps horaire à long terme sont peu accessibles, voire inexistantes.

Pour contourner ce problème, le fichier de référence IWEC utilisé pendant la modélisation qualitative du confort thermique dit fichier moyen est utilisé.

b. Les caractéristiques statistiques des données

Les paramètres météorologiques considérés dans cette thèse sont les six paramètres prédominants :

- La température de l'air extérieur,
- L'humidité relative de l'air ambiant,
- Le rayonnement direct et le rayonnement diffus,
- La direction du vent,
- La vitesse du vent.

Pour chaque période de simulation, la matrice des paramètres d'entrée s'écrit :

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,4} & x_{1,5} & x_{1,6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{j,1} & x_{j,2} & x_{j,3} & x_{j,4} & x_{j,5} & x_{j,6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{168,1} & x_{168,2} & x_{168,3} & x_{168,4} & x_{168,5} & x_{168,6} \end{bmatrix} \quad (80)$$

1. Distributions de chaque paramètre

Comme un seul échantillon de valeurs est disponible et qu'aucune valeur-préférentielle susceptible de se produire n'est favorisée, une distribution normale est utilisée pour chaque paramètre. Les moyennes sont les éléments  $x_{j,i}$  ( $i = 1, \dots, p$  et  $j = 1, \dots, N$ ) de  $X$  qui sont directement issues du fichier source. Les écarts maximaux des valeurs sont de  $\pm 5\%$  pour les température extérieure, humidité relative de l'air, rayonnements et vitesse du vent. Pour la direction du vent, cet écart maximal est de  $\pm 15^\circ$ .

2. L'auto-corrélation de chaque paramètre

Chaque colonne  $X_{.,i}$  de  $X$  est réarrangée pour une matrice de (24 heures x 7jours) :

$$X_{.,i} = \begin{bmatrix} x_{1,i} & x_{8,i} & x_{15,i} & \dots & x_{148,i} & x_{155,i} & x_{162,i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{7,i} & x_{14,i} & x_{21,i} & \dots & x_{154,i} & x_{161,i} & x_{168,i} \end{bmatrix} \quad (81)$$

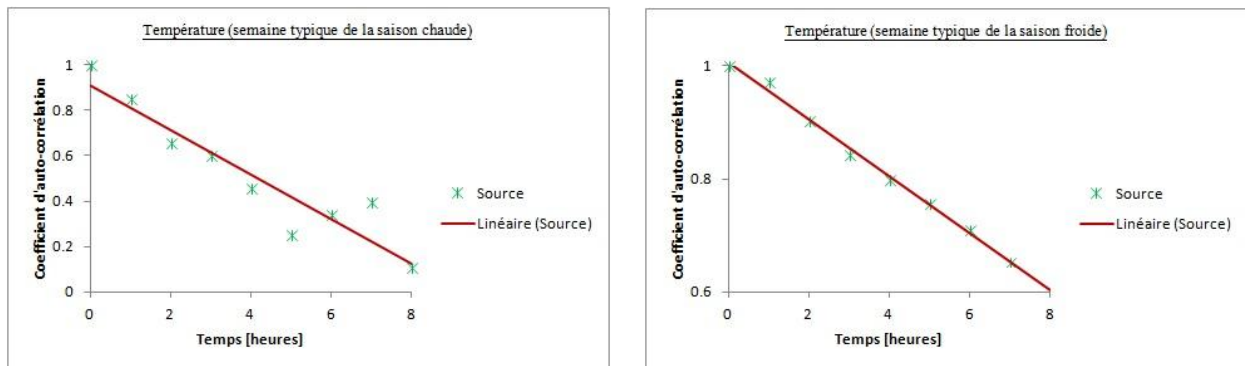
$$X_{.,i} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^i & x_{1,2}^i & x_{1,3}^i & \cdots & x_{1,22}^i & x_{1,23}^i & x_{1,24}^i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{7,1}^i & x_{7,2}^i & x_{7,3}^i & \cdots & x_{7,22}^i & x_{7,23}^i & x_{7,24}^i \end{bmatrix} \quad (81')$$

La matrice d'auto-covariance est estimée de la manière suivante :

$$A^i(t_k, t_l) = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^7 x_{j,k}^i * x_{j,l}^i \quad (82)$$

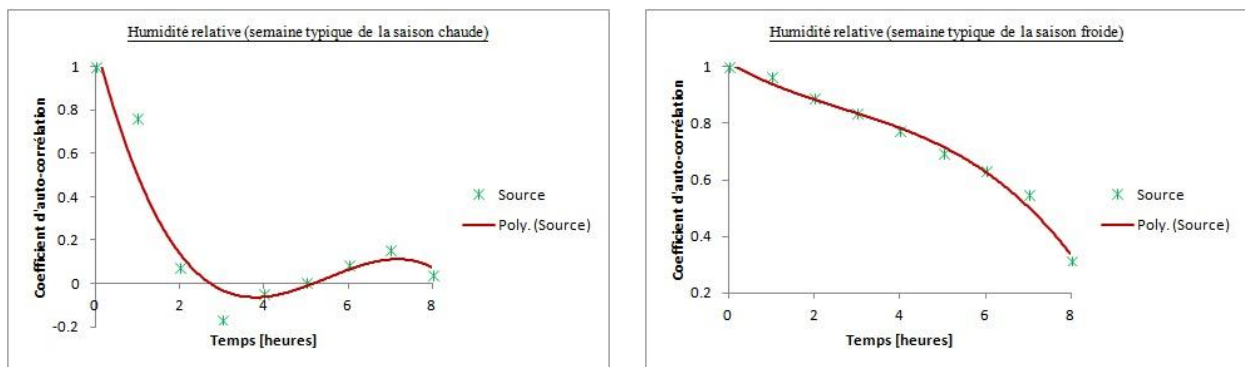
A peut être normalisée pour avoir la matrice d'auto-corrélation.

— Pour la température de l'air extérieur, nous avons la figure 21.



**Figure 21. Fonction d'auto-corrélation de la température des semaines typiques des 2 saisons**

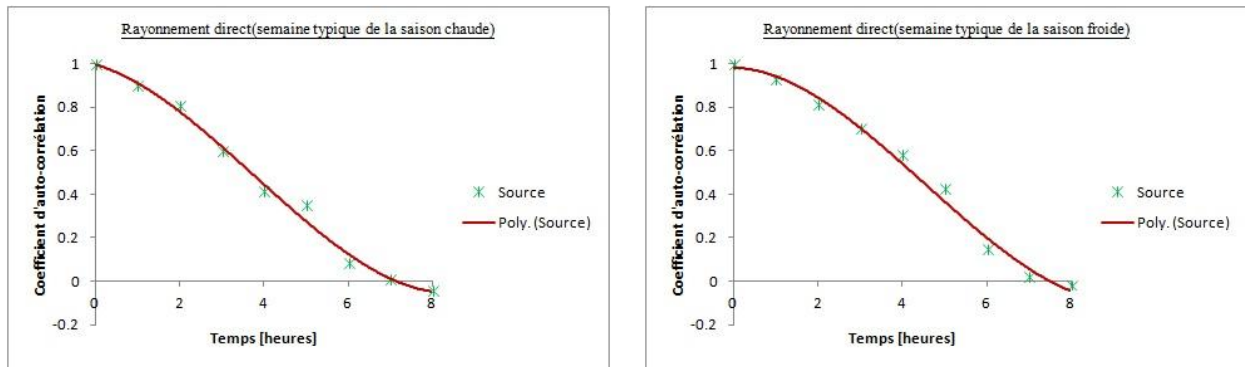
— Pour l'humidité relative de l'air ambiant, nous avons la figure 22.



**Figure 22. Fonction d'auto-corrélation de l'humidité relative de l'air des semaines typiques des 2 saisons**

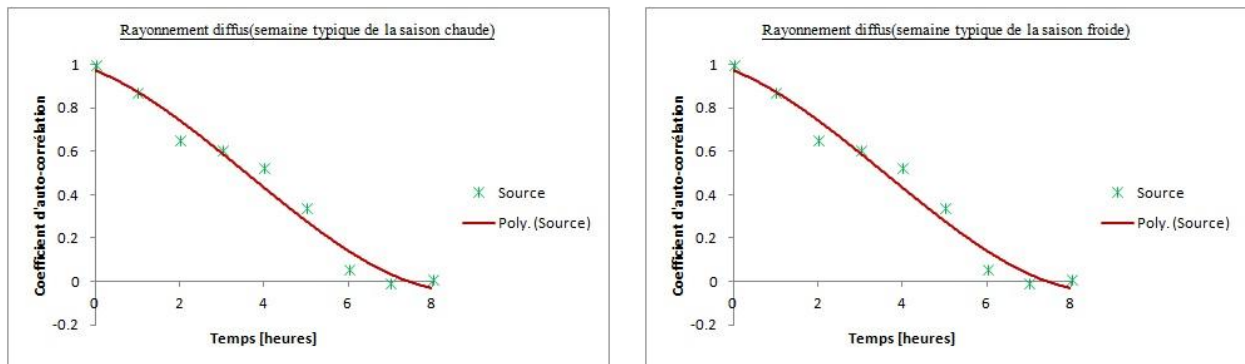
# Identification des paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type

— Pour le rayonnement direct, nous avons la figure 23.



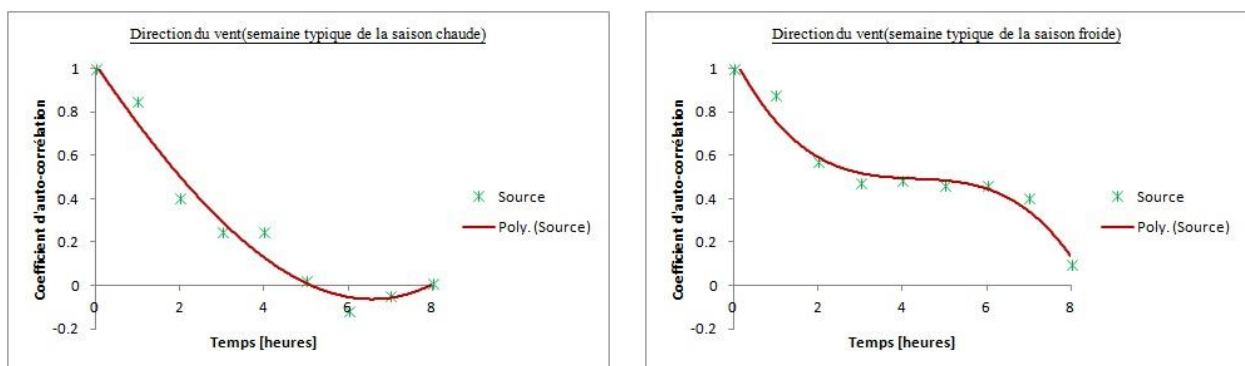
**Figure 23. Fonction d'auto-corrélation du rayonnement direct des semaines typiques des 2 saisons**

— Pour le rayonnement diffus, nous avons la figure 24.



**Figure 24. Fonction d'auto-corrélation du rayonnement diffus des semaines typiques des 2 saisons**

— Pour la direction du vent, nous avons la figure 25.



**Figure 25. Fonction d'auto-corrélation de la direction du vent des semaines typiques des 2 saisons**

— Pour la vitesse du vent, nous avons la figure 26.

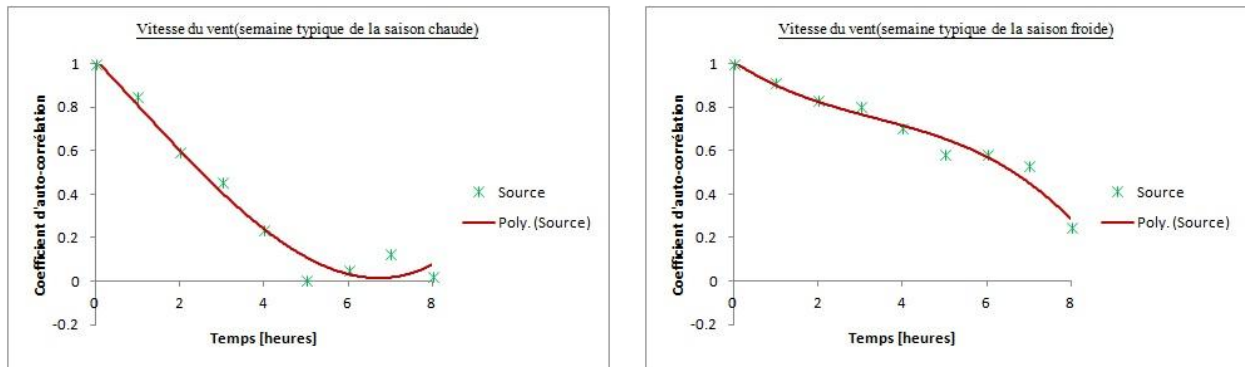


Figure 26. Fonction d'auto-corrélation de la vitesse du vent des semaines typiques des 2 saisons

### 3. La corrélation entre les paramètres

En se basant sur la matrice des variables d'entrée définie par :

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & x_{1,4} & x_{1,5} & x_{1,6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{k,1} & x_{k,2} & x_{k,3} & x_{k,4} & x_{k,5} & x_{k,6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{168,1} & x_{168,2} & x_{168,3} & x_{168,4} & x_{168,5} & x_{168,6} \end{bmatrix} \quad (83)$$

Le coefficient de corrélation de Pearson  $C(x_i, x_j)$  entre  $x_i$  et  $x_j$  est estimé par :

$$C(x_i, x_j) = \frac{1}{167} \sum_{k=1}^{168} x_{k,i} * x_{k,j} \quad (84)$$

avec  $i, j = 1, \dots, 6$ .

Pour la semaine typique de la saison chaude, les valeurs des coefficients de corrélation de Pearson des six variables pour le signal source sont données par le tableau 10.

**Tableau 3-2. Matrice de corrélation de six variables d'entrée pour la semaine typique de la saison chaude**

	<b>Temp</b>	<b>Hum</b>	<b>Dir</b>	<b>Diff</b>	<b>DirVent</b>	<b>VitVent</b>
<b>Temp</b>	1.0000	-0.9758	0.5979	0.7253	0.3441	0.4726
<b>Hum</b>	-0.9758	1.0000	-0.5652	-0.6938	-0.3289	-0.4652
<b>Dir</b>	0.5979	-0.5652	1.0000	0.5377	0.2065	0.0182
<b>Diff</b>	0.7253	-0.6938	0.5377	1.0000	0.2949	0.3055
<b>DirVent</b>	0.3441	-0.3289	0.2065	0.2949	1.0000	0.4998
<b>VitVent</b>	0.4726	-0.4652	0.0182	0.3055	0.4998	1.0000

Pour la semaine typique de la saison froide, ces valeurs sont données par le tableau 10.

**Tableau 3-3. Matrice de corrélation de six variables d'entrée pour la semaine typique de la saison froide**

	<b>Temp</b>	<b>Hum</b>	<b>Dir</b>	<b>Diff</b>	<b>DirVent</b>	<b>VitVent</b>
<b>Temp</b>	1.0000	-0.9209	0.5934	0.6871	0.4712	0.5582
<b>Hum</b>	-0.9209	1.0000	-0.7348	-0.6625	-0.5075	-0.4698
<b>Dir</b>	0.5934	-0.7348	1.0000	0.5361	0.1416	0.1795
<b>Diff</b>	0.6871	-0.6625	0.5361	1.0000	0.3341	0.4180
<b>DirVent</b>	0.4712	-0.5075	0.1416	0.3341	1.0000	0.3908
<b>VitVent</b>	0.5582	-0.4698	0.1795	0.4180	0.3908	1.0000

### c. Création des échantillons

Si toutes les conditions de création des échantillons sont réunies, c'est-à-dire :

- la définition des densités de probabilité des paramètres d'entrée,
- l'évaluation des caractéristiques statistiques des données météorologiques de base,



la création des échantillons peut être effectuée. Pour  $N$  jeux de  $p$  entrées d'une durée de  $N_t$ , la procédure se résume comme suit :

- Création de  $N \times N_t$  échantillons indépendants, en utilisant l'échantillonnage LHS, pour les  $p$  entrées et pour un paramètres  $i$  ( $i = 1, \dots, p$ ), il vient :

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_{1,1}^i & \dots & \dots & \dots & \tilde{x}_{1,N_t}^i \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{j,1}^i & \dots & \dots & \dots & \tilde{x}_{j,N_t}^i \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{N,1}^i & \dots & \dots & \dots & \tilde{x}_{N,N_t}^i \end{bmatrix}$$

- Ajout de l'auto-corrélation par la méthode d'induction de la corrélation des rangs, pour un paramètres  $i$  ( $i = 1, \dots, p$ ) :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1,1}^i & \dots & \dots & \dots & \dot{x}_{1,N_t}^i \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \dot{x}_{j,1}^i & \dots & \dots & \dots & \dot{x}_{j,N_t}^i \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \dot{x}_{N,1}^i & \dots & \dots & \dots & \dot{x}_{N,N_t}^i \end{bmatrix}$$

- Ajout de la corrélation entre les paramètres par la méthode d'induction de la corrélation des rangs à partir de la matrice créée par les lignes  $j$  de chaque paramètre :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{j,1}^1 & \dots & \dots & \dots & \dot{x}_{j,1}^p \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \dot{x}_{j,N_t}^1 & \dots & \dots & \dots & \dot{x}_{j,N_t}^p \end{bmatrix}$$

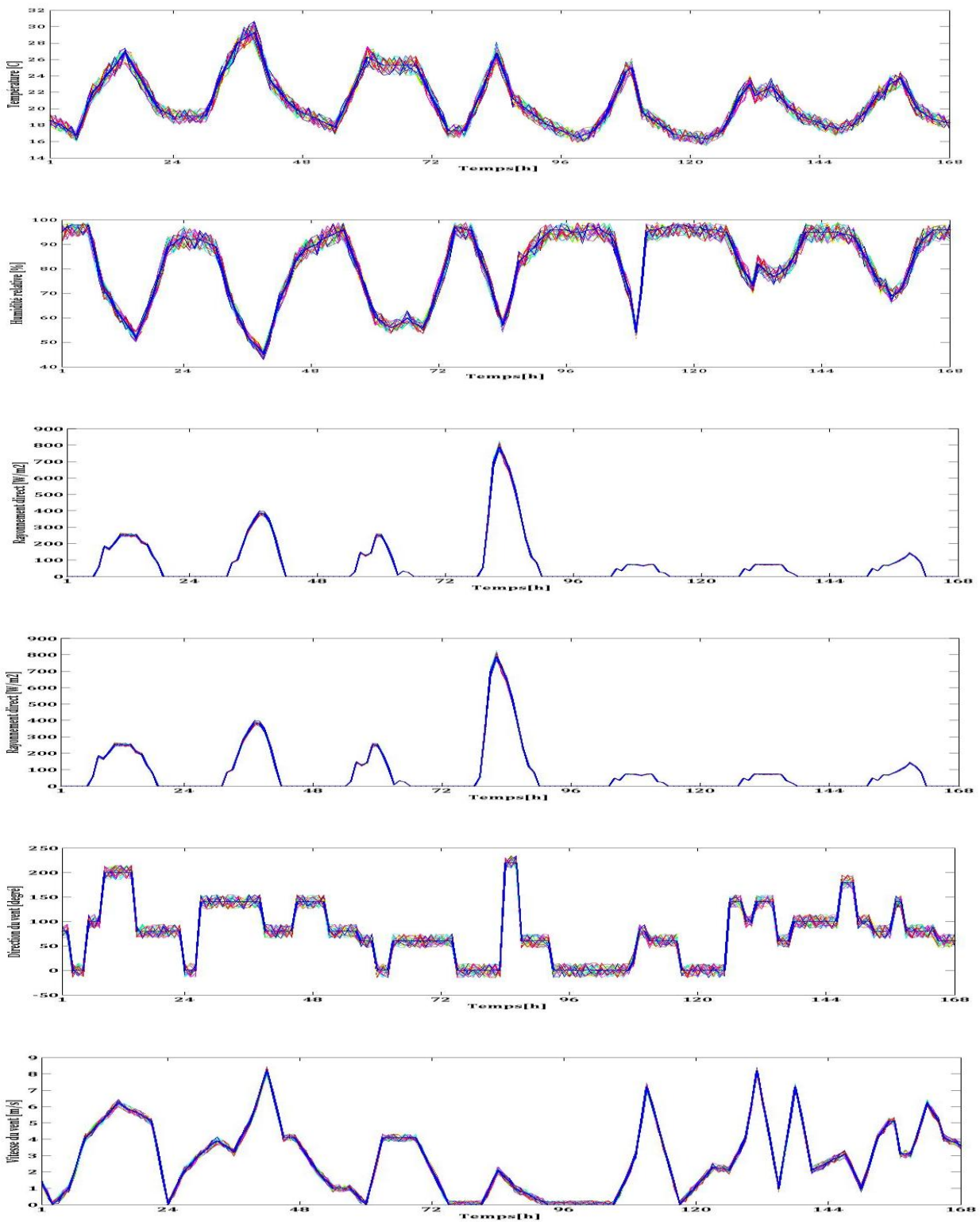
Ainsi, des échantillons qui satisfont aux conditions de la méthode d'analyse de sensibilité et cohérents aux conditions climatiques sont obtenus.

Pour un paramètres  $i$  ( $i = 1, \dots, p$ ), nous avons :

$$\begin{bmatrix} x_{1,1}^i & \dots & \dots & \dots & x_{1,N_t}^i \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ x_{j,1}^i & \dots & \dots & \dots & x_{j,N_t}^i \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ x_{N,1}^i & \dots & \dots & \dots & x_{N,N_t}^i \end{bmatrix}$$

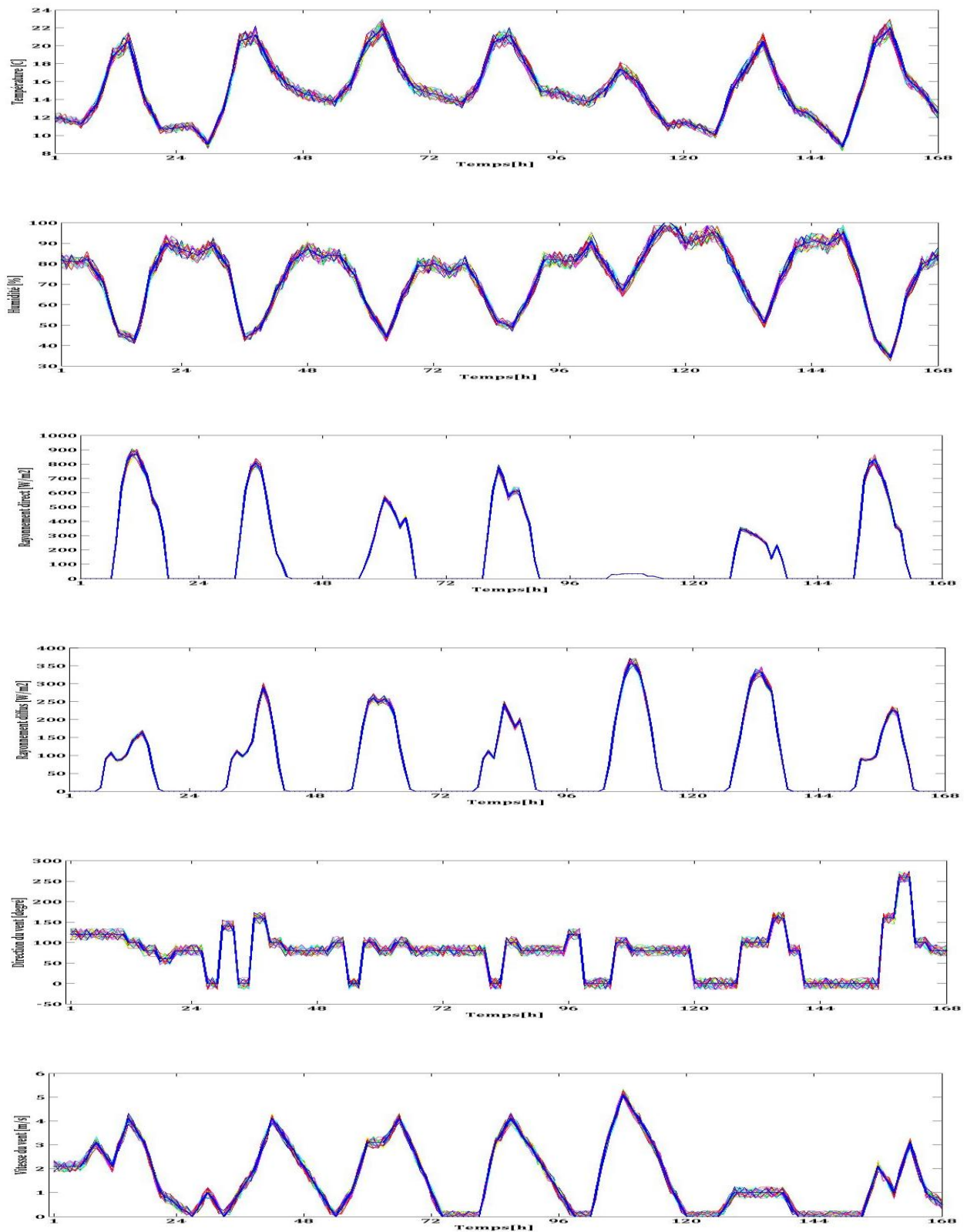
L'approche est utilisée pour créer 1000 semaines typiques des deux saisons (chaude et froide). 20 échantillons tirés de façon aléatoire sont représentés sur la Figure 27, pour la semaine typique de la saison chaude et sur la Figure 28, pour la semaine typique de la saison froide. Le comportement des échantillons créés semblent cohérents avec le comportement du fichier source IWECC.

# Identification des paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type



**Figure 27.** Allure générale des 20 échantillons créés et celle du signal source (semaine typique de la saison chaude)

# Identification des paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type



**Figure 28. Allure générale des 20 échantillons créés et celle du signal source (semaine typique de la saison froide)**

### 3.1.2.3 Vérification des échantillons

---

Pour que les échantillons créés soient utilisables en analyse d'incertitude en thermique du bâtiment, elles doivent satisfaire aux exigences de la méthode d'analyse de sensibilité appliquée et aussi être cohérentes aux données climatiques du site.

Rappelons que concernant la cohérence des échantillons aux données climatiques, les échantillons doivent respecter ou au moins rapprocher les caractéristiques statistiques du fichier source.

Pour l'analyse de sensibilité, les échantillons doivent permettre la propagation des incertitudes des paramètres dans le modèle et la caractérisation de la variabilité que ces incertitudes ont induites dans la sortie du modèle.

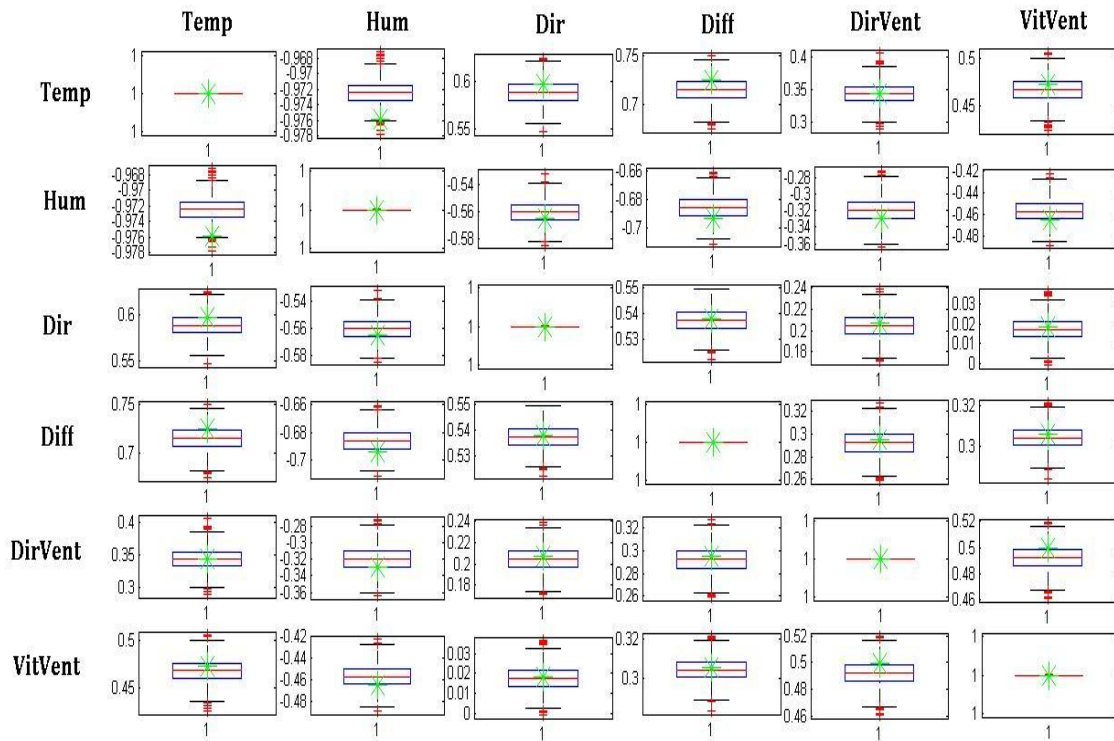
#### a. La corrélation entre les paramètres

---

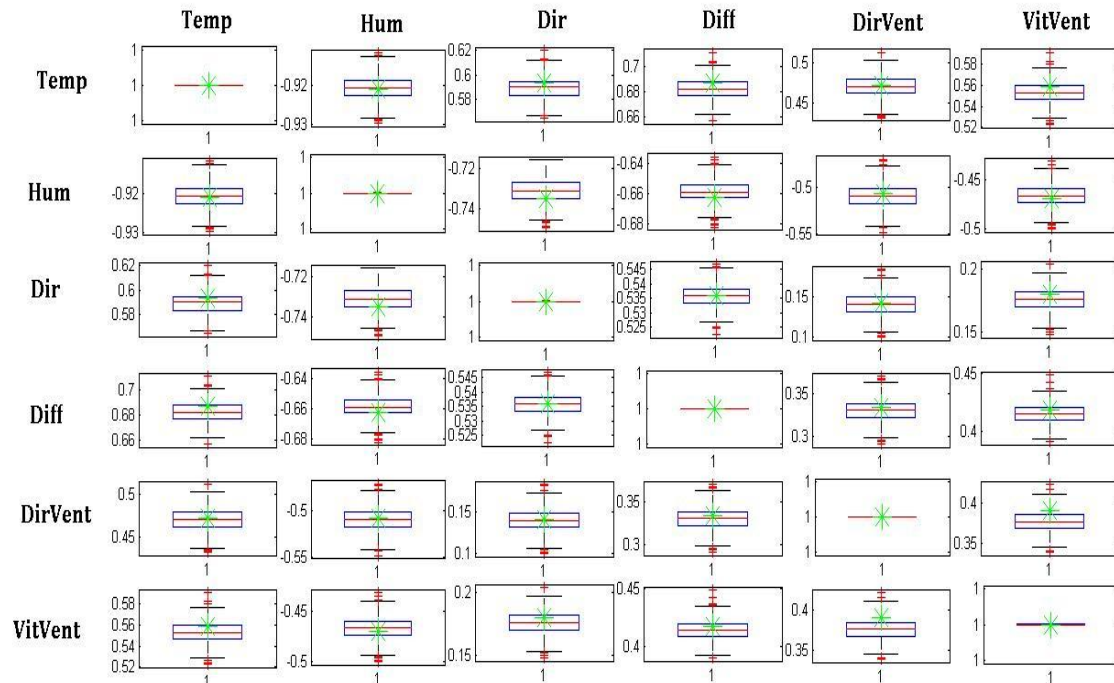
L'inter-corrélation des paramètres dans les échantillons peut être vérifiée à l'aide d'une représentation par boxplot ou boîte à moustache. Cette représentation est utilisée pour visualiser la dispersion des échantillons (ici les coefficients de corrélation entre les paramètres dans les échantillons créés) par rapport à la valeur de référence (ici les coefficients de corrélation entre les paramètres du fichier source en étoile verte).

On peut déduire à partir des Figure 29 et 30 que la tendance inter-corrélative des paramètres est respectée.

# Identification des paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type



**Figure 29. Matrice de corrélation entre les paramètres sous forme boxplot (semaine typique de la saison chaude)**



**Figure 30. Matrice de corrélation entre les paramètres sous forme boxplot (semaine typique de la saison froide)**

b. L'auto-corrélation de chaque paramètre

La vérification de l'auto-corrélation est effectuée en comparant une semaine tirée au hasard parmi les 1000 créées avec la semaine de référence.

Les Figure 32 et 32 montrent l'évolution de l'inter-corrélation entre la température et l'humidité (ces 2 paramètres sont fortement liés) lors du processus de création des données météorologiques.

Les 2 figures montrent l'adéquation de la distribution de probabilité de l'échantillon (tiré au hasard) avec le signal source et aussi l'induction de l'auto-corrélation à l'échantillon (nuage des points linéaire).

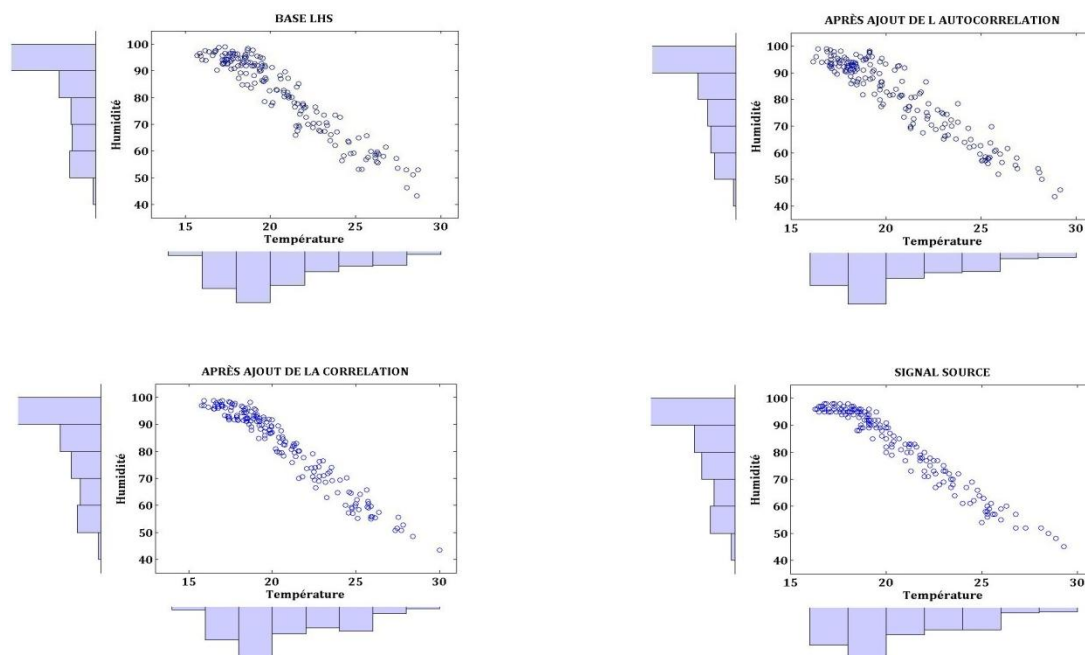
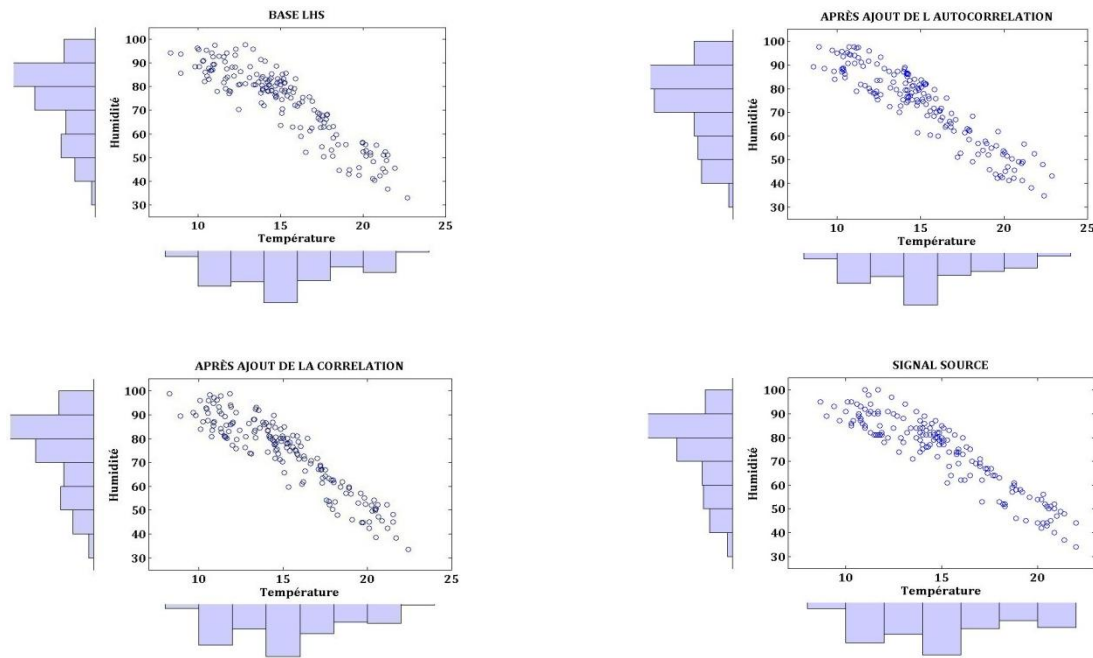


Figure 31. Evolution de la corrélation entre la température et l'humidité durant le processus de création des données météorologiques (semaine typique de la saison chaude)



**Figure 32. Evolution de la corrélation entre la température et l'humidité durant le processus de création des données météorologiques (semaine typique de la saison froide)**

### c. Couverture de l'espace

Pour pouvoir propager les incertitudes aux sorties du modèle, les échantillons créés doivent être répartis sur l'espace de variation (distribution de probabilité) de chaque paramètre sans perdre la logique physique sous-jacente (la corrélation entre les paramètres).

La couverture de l'espace de variation de chaque paramètre par les échantillons créés est vérifiée suivant l'évolution de l'inter-corrélation entre la température de l'air extérieure et son humidité relative (ces deux paramètres sont fortement corrélés).

1000 échantillons du couple (température extérieure, humidité relative) d'un temps tiré au hasard sont tracés sous forme scatter-plot durant le processus de création de ces échantillons.

Les Figure 33 et 34 montrent que les échantillons générés satisfont aux conditions d'analyse de sensibilité et respectent la relation entre les paramètres.



# Identification des paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment type

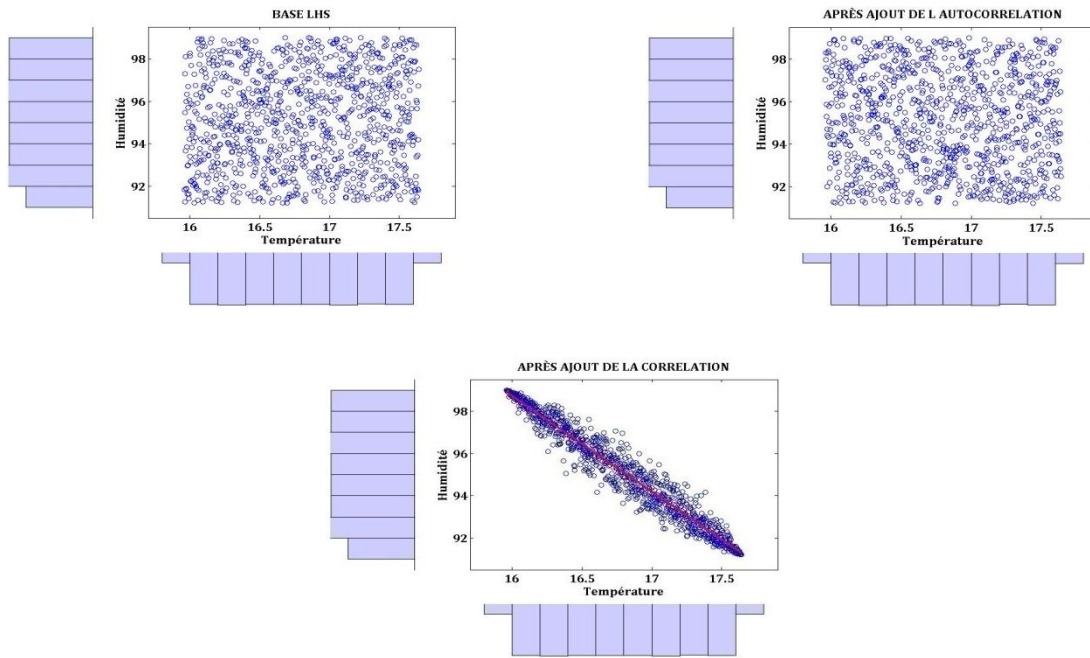


Figure 33. Couverture de l'espace Température-Humidité (semaine typique de la saison chaude)

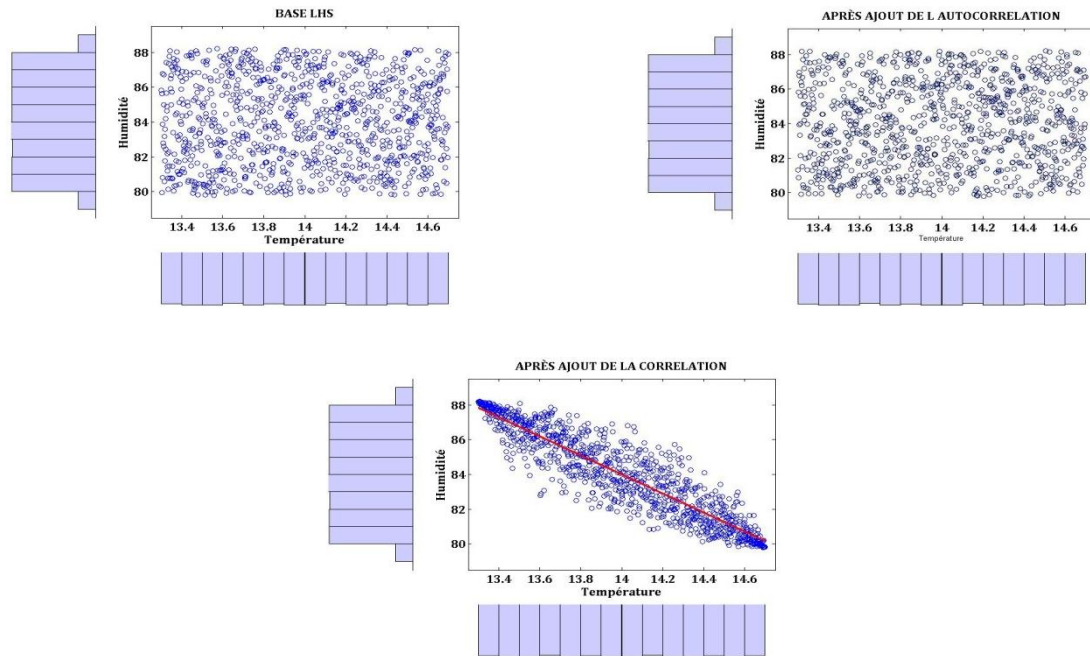


Figure 34. Couverture de l'espace Température-Humidité (semaine typique de la saison froide)

### 3.1.3 Estimation des influences de la variabilité des données météorologiques sur le confort hygrothermique

#### 3.1.3.1 Démarche méthodologique

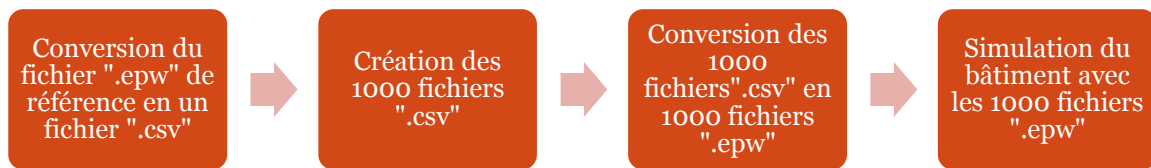
L'objectif est d'évaluer l'impact de variabilité des données météorologiques sur le confort thermique. Pour ce faire, la démarche méthodologique ci-après est adoptée.

**D'abord les caractérisation et création de la variabilité des données météorologiques** : cette première étape consiste à extraire les caractéristiques (l'auto-corrélation et l'inter-corrélation) des données météorologiques de référence IWEK d'Antananarivo et à échantillonner 1000 semaines par LHS de chaque période typique de la saison chaude ou froide, selon le cas. Les caractéristiques ainsi extraites sont ensuite induites aux 1000 échantillons.



Figure 35. Démarche méthodologique pour la caractérisation et création de la variabilité des données météorologiques

**Puis, l'expansion de la variabilité des données météorologiques sur le modèle** : cette deuxième étape consiste à créer des fichiers ".epw" à partir des 1000 échantillons obtenus précédemment et à simuler le bâtiment type avec les fichiers ainsi créés. La création des fichiers ".epw" est effectuée en modifiant le fichier original ".epw" de référence disponible sur le site de EnergyPlus. Le fichier ".epw" de référence est d'abord converti en un fichier ".csv" modifiable avec MSoffice excel, en utilisant "*Data Utility to assist in creating EnergyPlus Weather Formatted Data - [Convert Data]*" de Energy plus. Un fichier macro est ensuite créé pour automatiser la création des 1000 fichiers ".csv" à partir des 1000 échantillons. Les 1000 fichiers ".csv" sont ensuite convertis en fichiers ".epw" avec "*Data Utility to assist in creating EnergyPlus Weather Formatted Data - [Convert Data]*" et automatisé avec matlab en utilisant "*Javarobot*". La simulation du bâtiment avec ces 1000 fichiers créés est faite en utilisant l'option "*Group of input Files*" de EnergyPlus.



**Figure 36. Démarche méthodologique pour l'expansion des données météorologiques sur le modèle**

**La collecte des résultats :** les résultats obtenus sont au format ".csv"; les 1000 fichiers sont rassemblés en utilisant l'automatisation ".bat".

**L'estimation des indices de sensibilité :** les indices de sensibilité sont estimées à partir de la méthode énumérer en début de ce chapitre.

**Finalement, l'interprétation des résultats et discussion :** les résultats obtenus sont ensuite interprétés et nous concluons avec une discussion.



**Figure 37. Estimation des influences de la variabilité des données météorologiques sur le confort hygrothermique**

### 3.1.3.2 Influences générales des paramètres

#### a. Semaine typique de la saison chaude

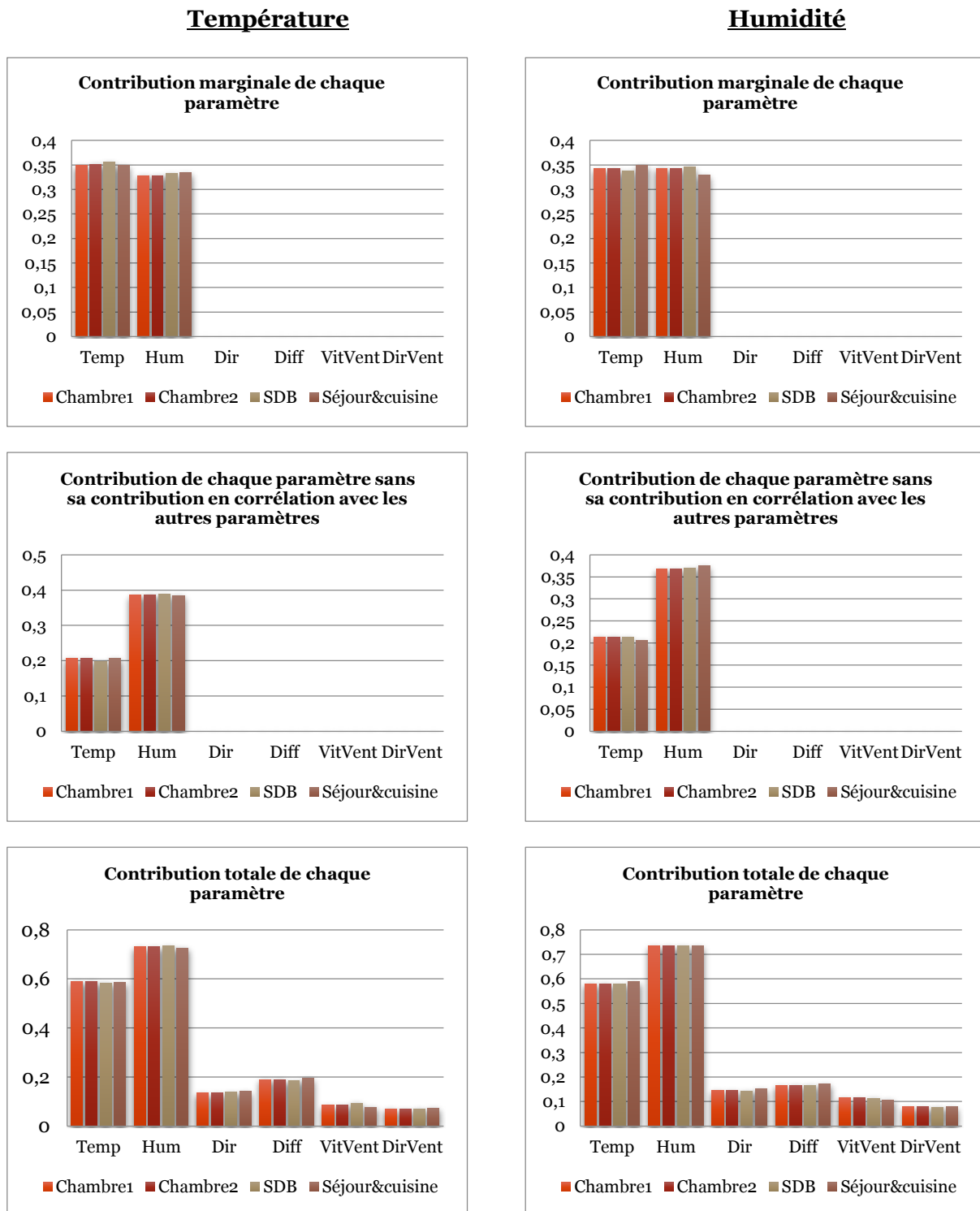


Figure 38. Indices de sensibilité générales (été)

b. Semaine typique de la saison froide

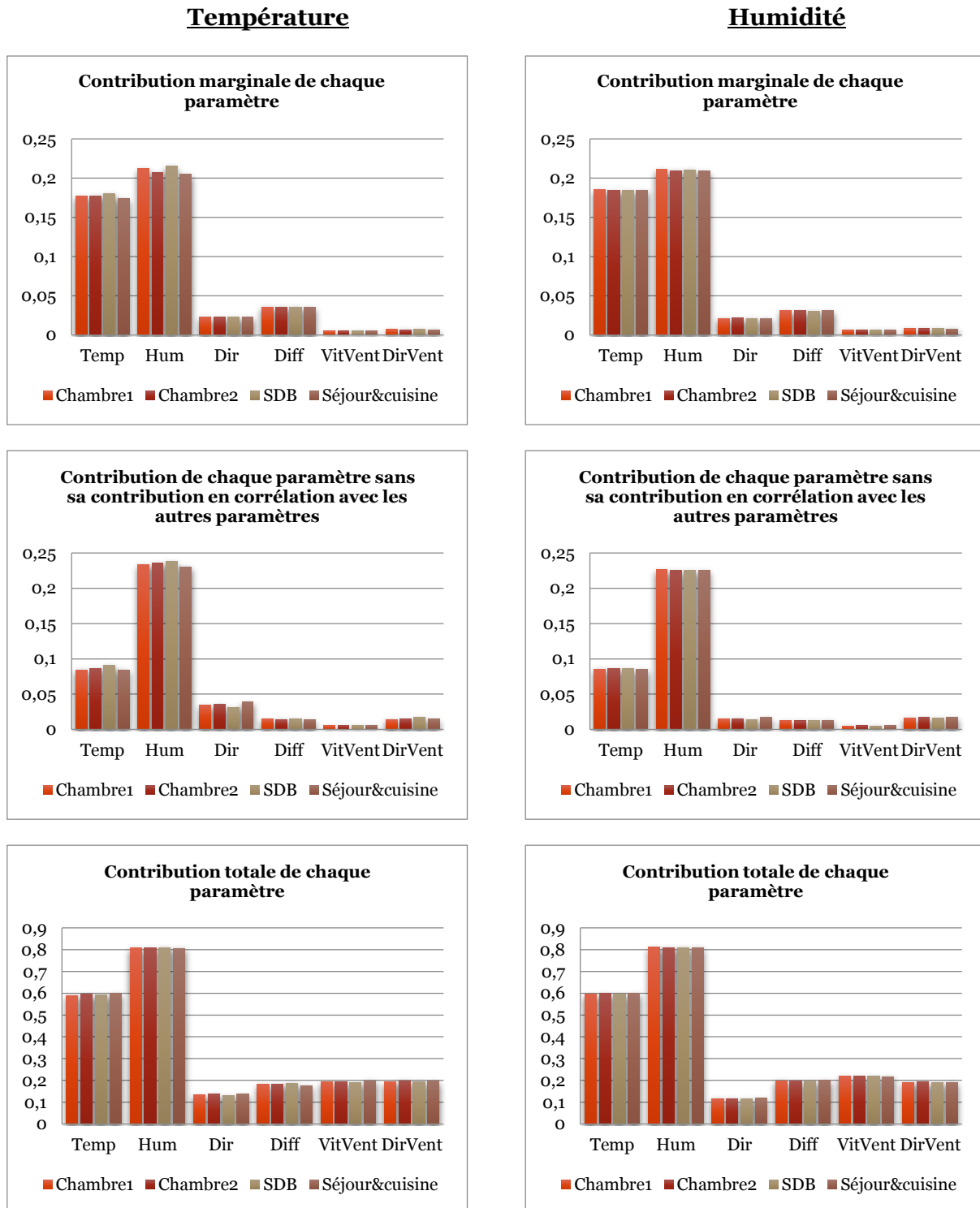


Figure 39. Indices de sensibilité générales (hiver)

Pour les deux sorties, la température et l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment qui sont les deux paramètres définissant le confort hygrothermique et les influences de chaque paramètre sont quasi-identiques.

Les contributions de chaque paramètre météorologique dans chaque zone sont aussi les mêmes.

En se référant aux effets totaux, les figures 38 et 39 montrent que l'humidité relative de l'air extérieur est le paramètre le plus influent sur la variabilité du confort hygrothermique, suivi de la température de l'air extérieur. Les autres paramètres ont presque la même contribution totale.

Les différences entre les contributions totales de chaque paramètre et leurs contributions marginales sont très importantes ( $\sim 0.43$  pour la température extérieure,  $\sim 0.6$  pour l'humidité relative de l'air,  $\sim 0.115$  pour le rayonnement direct,  $\sim 0.145$  pour le rayonnement diffus,  $\sim 0.19$  pour la vitesse du vent,  $\sim 0.19$  pour la direction du vent), ce qui implique l'importance des effets d'interaction des paramètres dans le modèle.

Les figures 40 et 41 donnent les contributions en corrélation avec les autres paramètres de chaque paramètre.

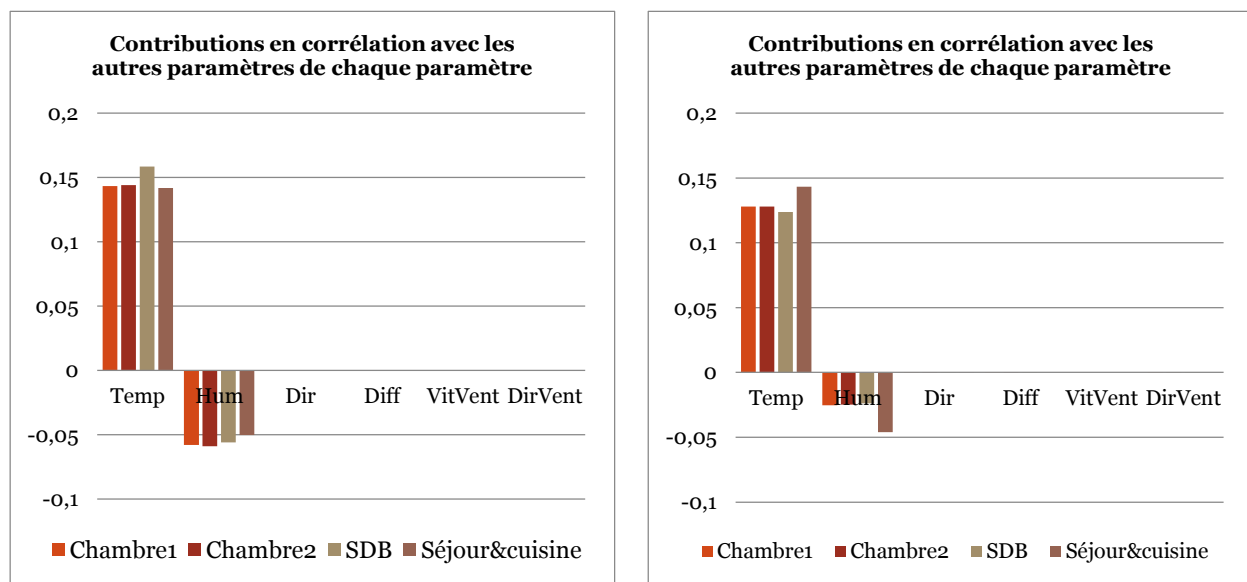
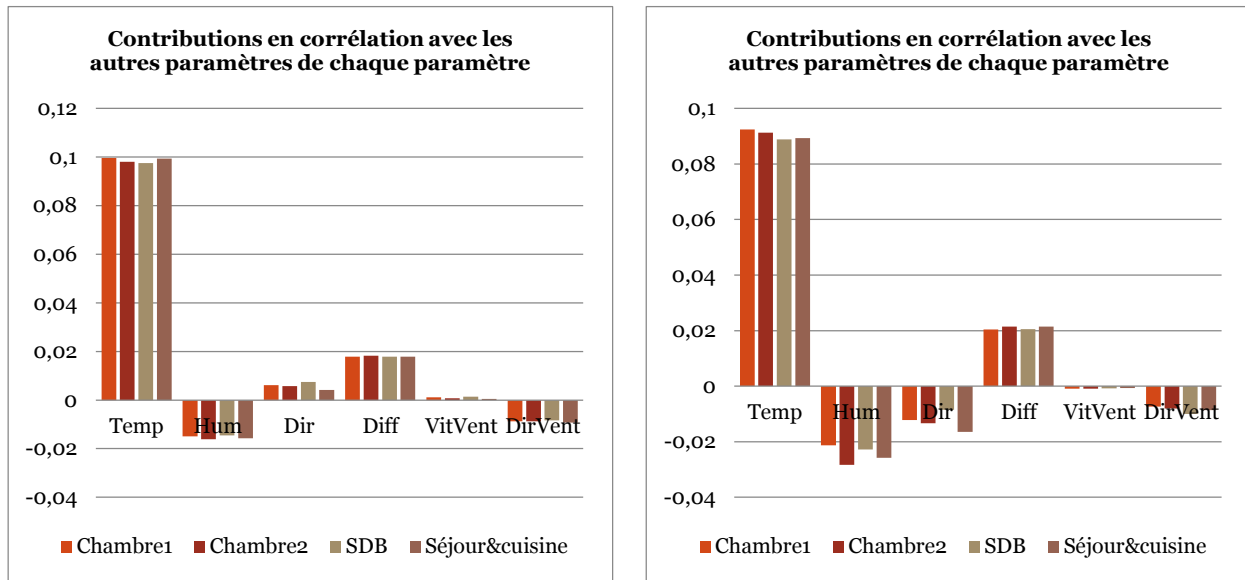


Figure 40. Contributions en corrélation avec les autres paramètres de chaque paramètre (été)



**Figure 41. Contributions en corrélation avec les autres paramètres de chaque paramètre (hiver)**

Ces figures montrent l'importance de la contribution en corrélation avec les autres paramètres de la température de l'air extérieur.

Il est judicieux de noter que les contributions en corrélation avec les autres paramètres peuvent être négatives comme le cas de l'humidité relative. Ces indices sont considérés comme toutes les valeurs des autres indices (positives), le signe négatif est dû uniquement aux valeurs des coefficients de corrélation qui sont aussi négatives.

### 3.1.3.3 Dynamique des indices de sensibilité

#### a. Contributions marginales

Les figures 42 jusqu'à 47 montrent la dynamique des contributions marginales de chaque paramètre pendant la saison chaude. Celle pendant la saison froide est donnée par les figures 48 jusqu'à 53.

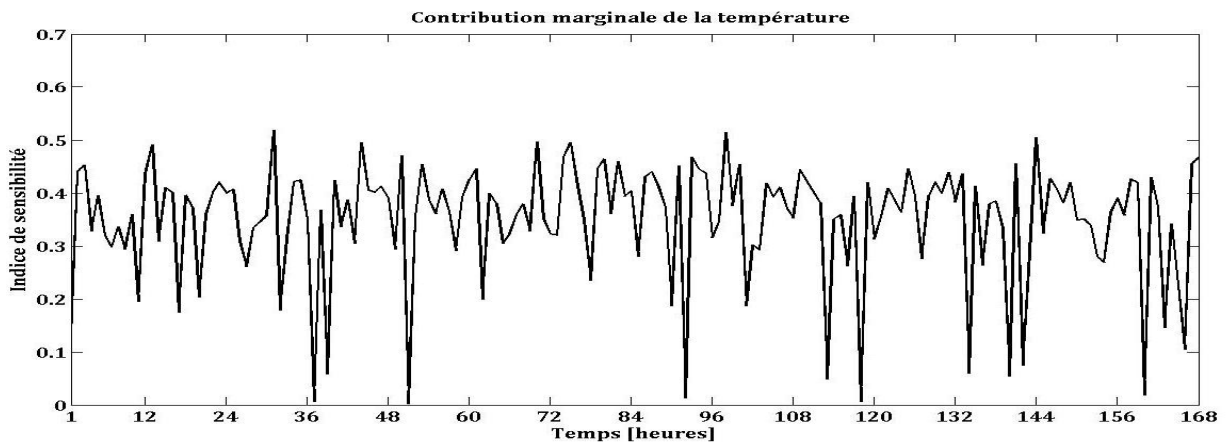


Figure 42. Dynamique de la contribution marginale de la température de l'air extérieur (été)

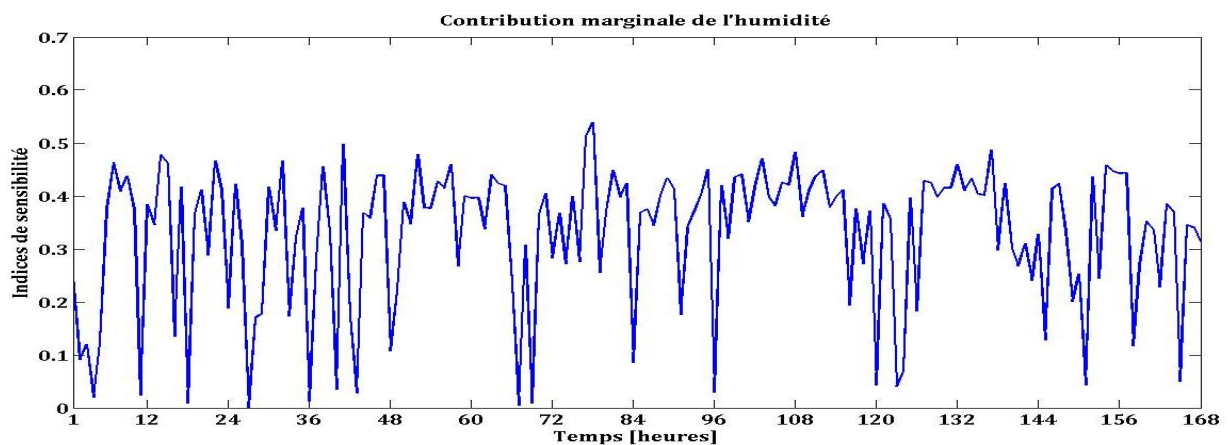


Figure 43. Dynamique de la contribution marginale de l'humidité de l'air extérieur (été)



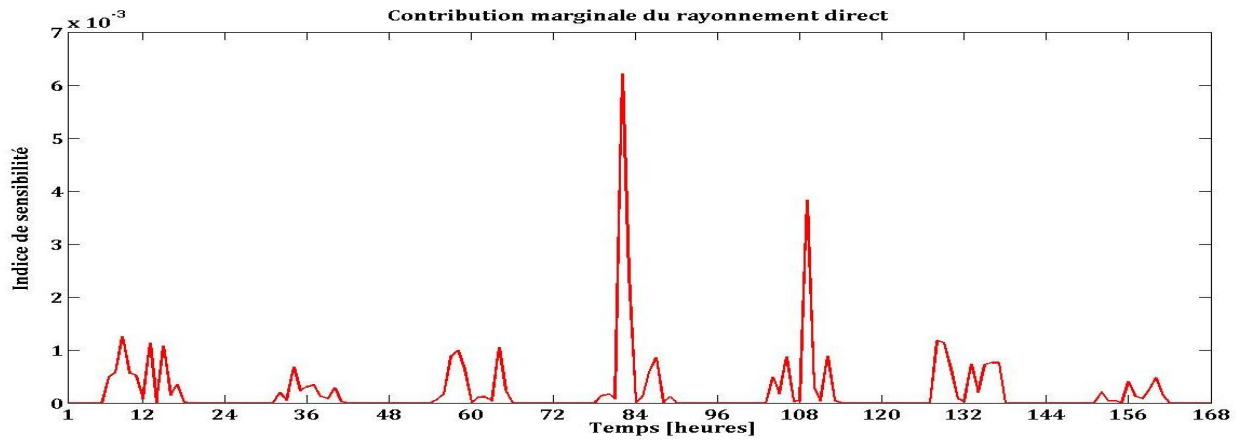


Figure 44. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement direct (été)

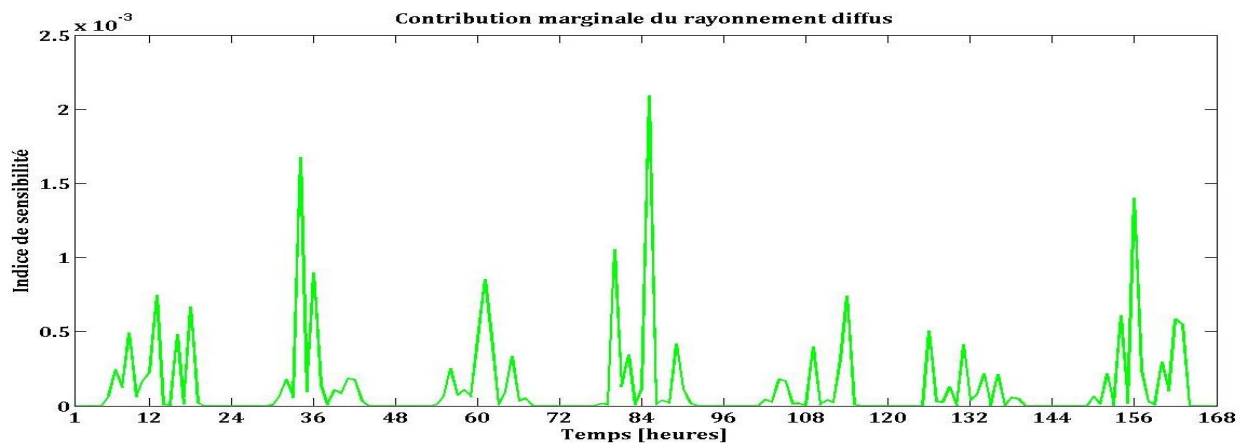


Figure 45. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement diffus(été)

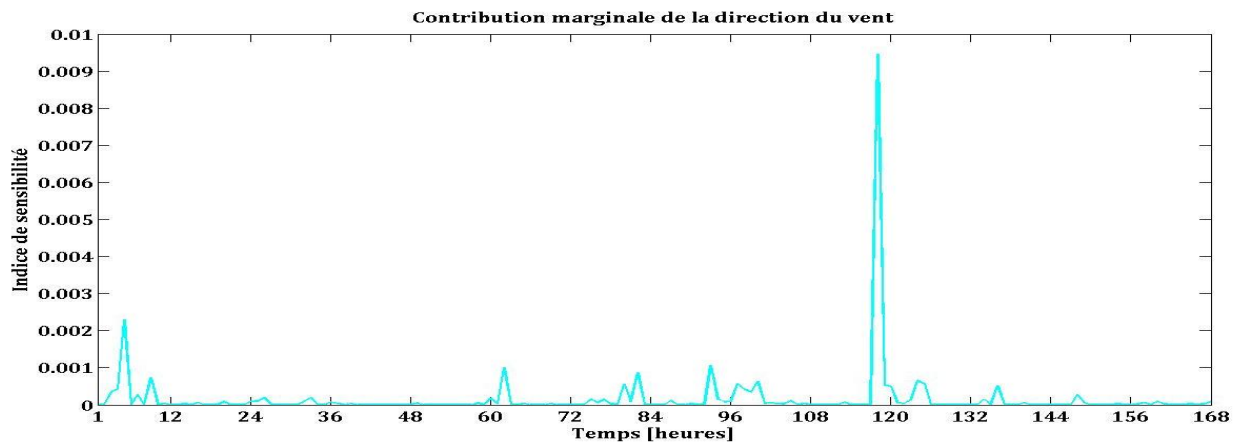


Figure 46. Dynamique de la contribution marginale de la direction du vent(été)

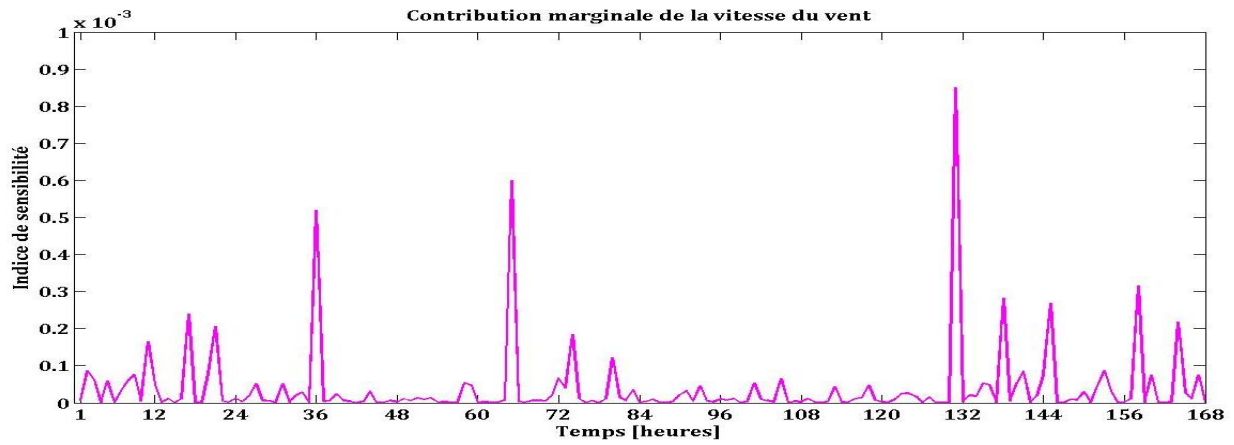


Figure 47. Dynamique de la contribution marginale de la vitesse du vent (été)

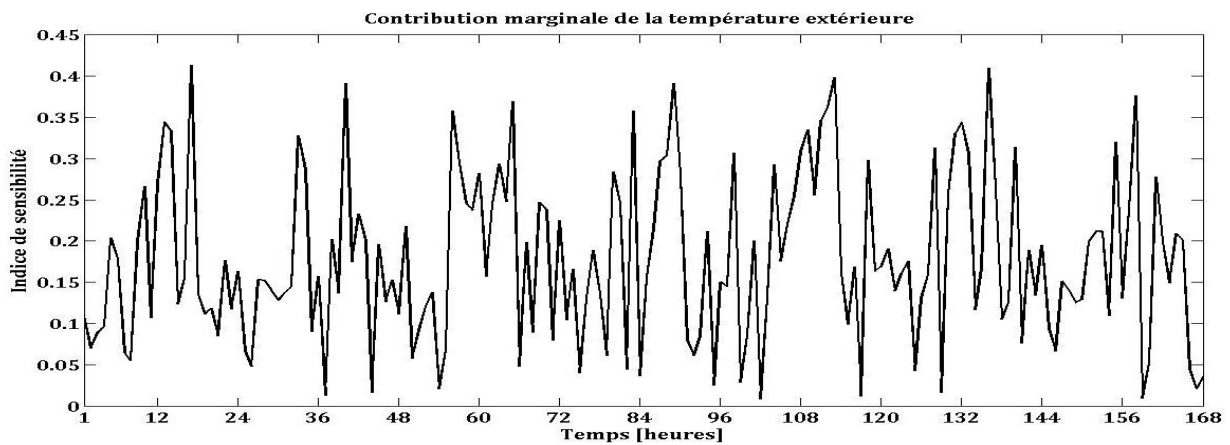


Figure 48. Dynamique de la contribution marginale de la température de l'air extérieure (hiver)

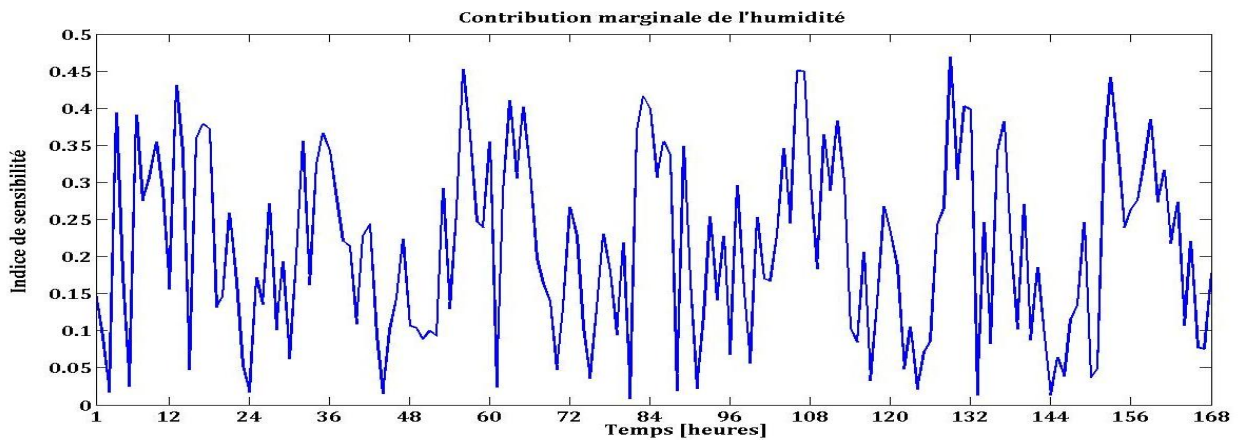


Figure 49. Dynamique de la contribution marginale de l'humidité relative de l'air extérieure (hiver)

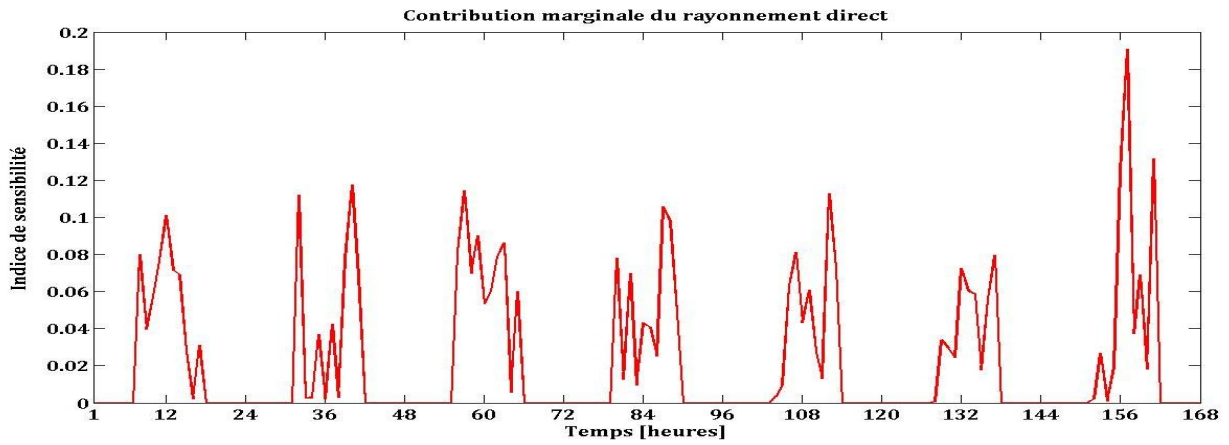


Figure 50. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement direct (hiver)

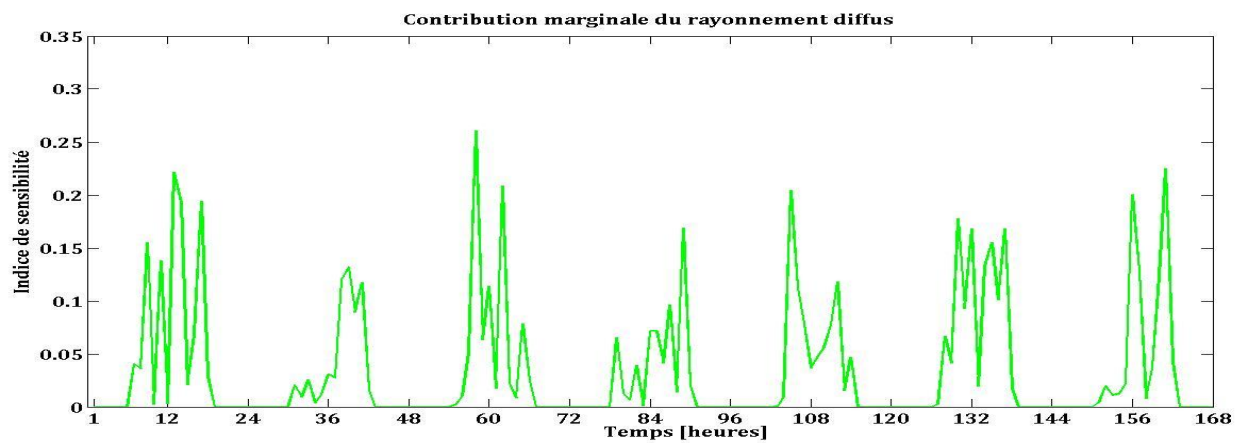


Figure 51. Dynamique de la contribution marginale du rayonnement diffus (hiver)

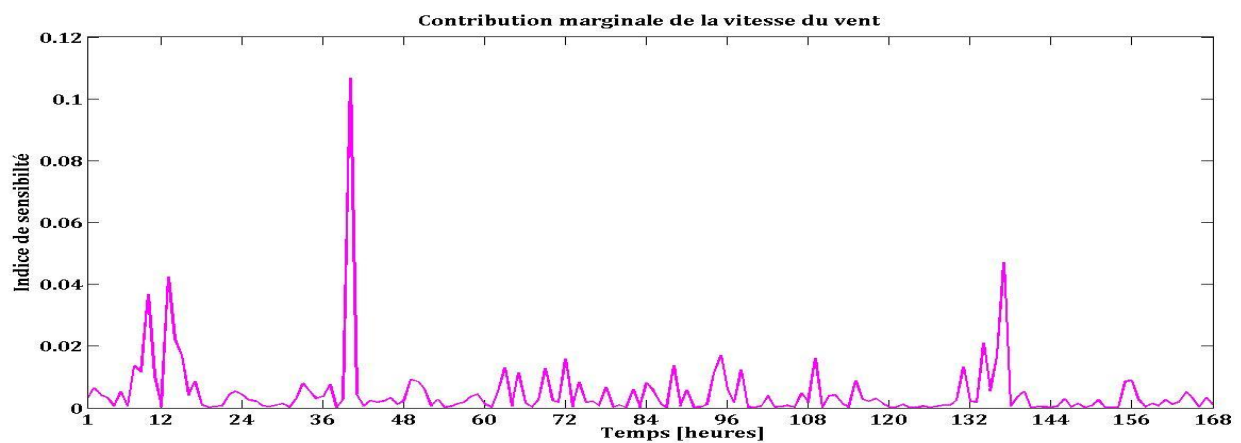


Figure 52. Dynamique de la contribution marginale de la direction du vent (hiver)

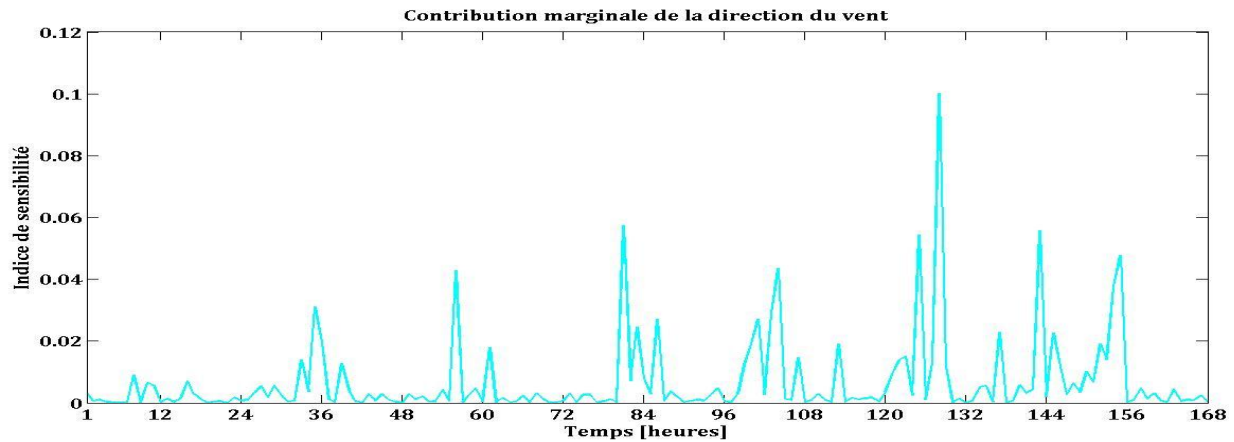


Figure 53. Dynamique de la contribution marginale de la vitesse du vent (hiver)

b. Contribution de chaque paramètre sans leur contribution en corrélation avec les autres paramètres

Les figures 54 jusqu'à 59 montrent la dynamique des contributions de chaque paramètre sans leur contribution en corrélation avec les autres paramètres pendant la saison chaude. Celle pendant la saison froide est donnée par les figures 60 jusqu'à 65.

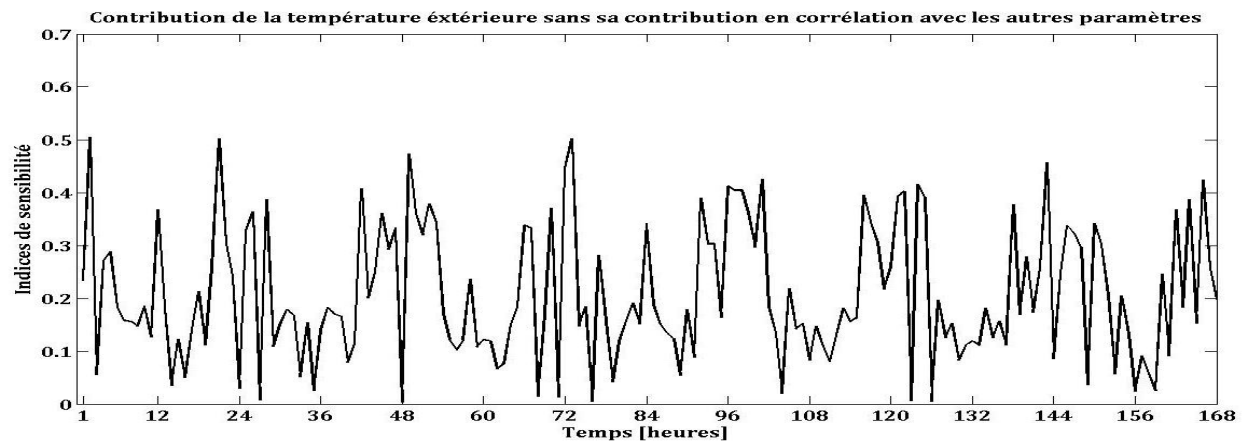


Figure 54. Dynamique de la contribution de la température de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été)

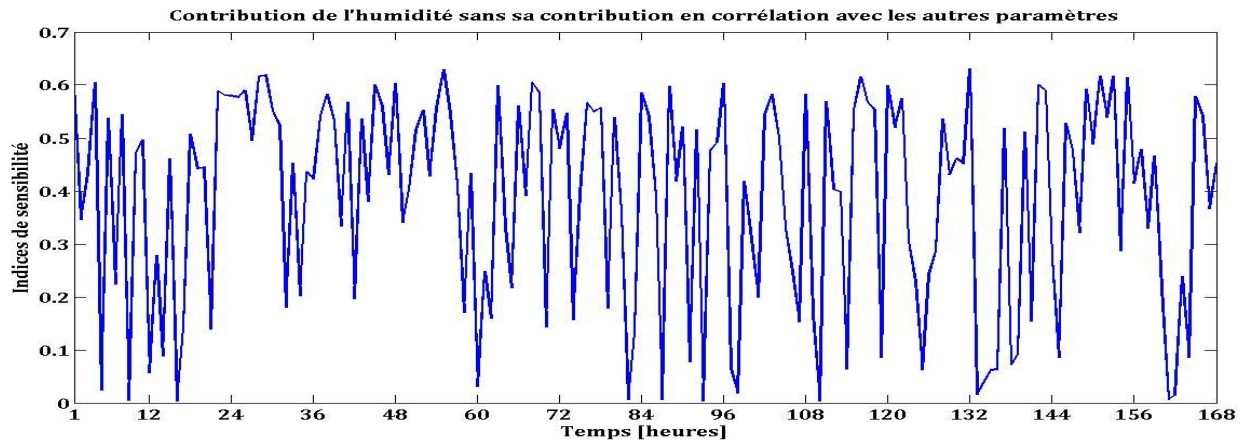


Figure 55. Dynamique de la contribution de l'humidité relative de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été)

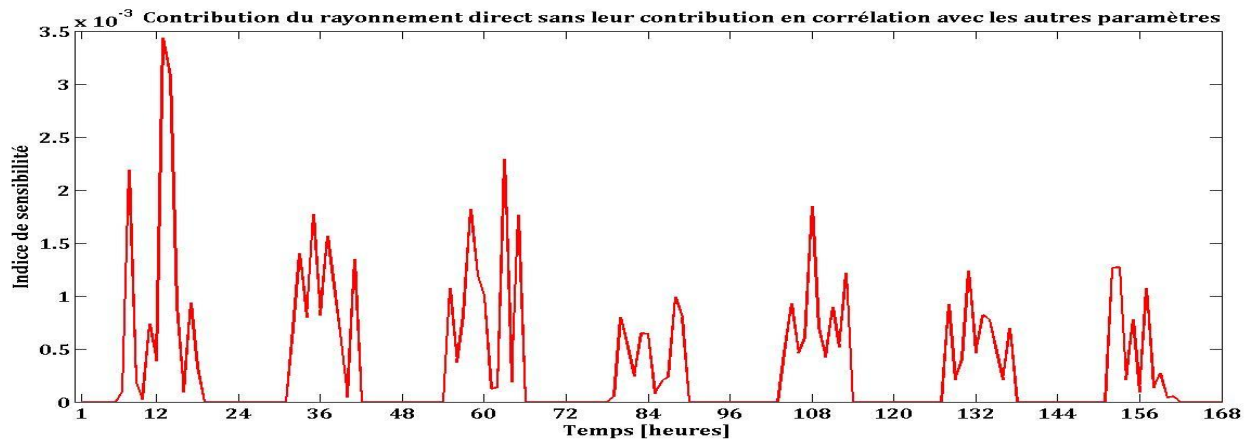


Figure 56. Dynamique de la contribution du rayonnement direct sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été)

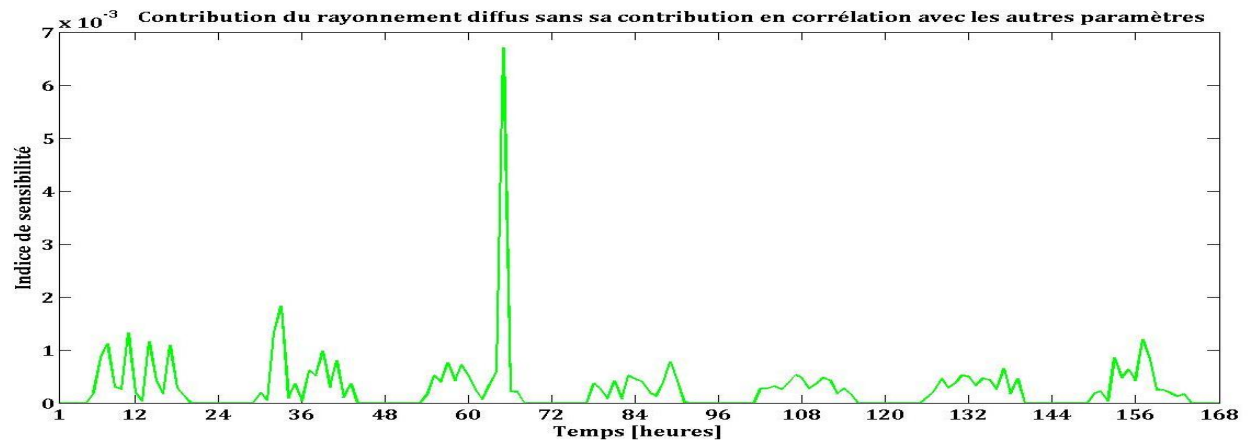


Figure 57. Dynamique de la contribution du rayonnement diffus sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été)

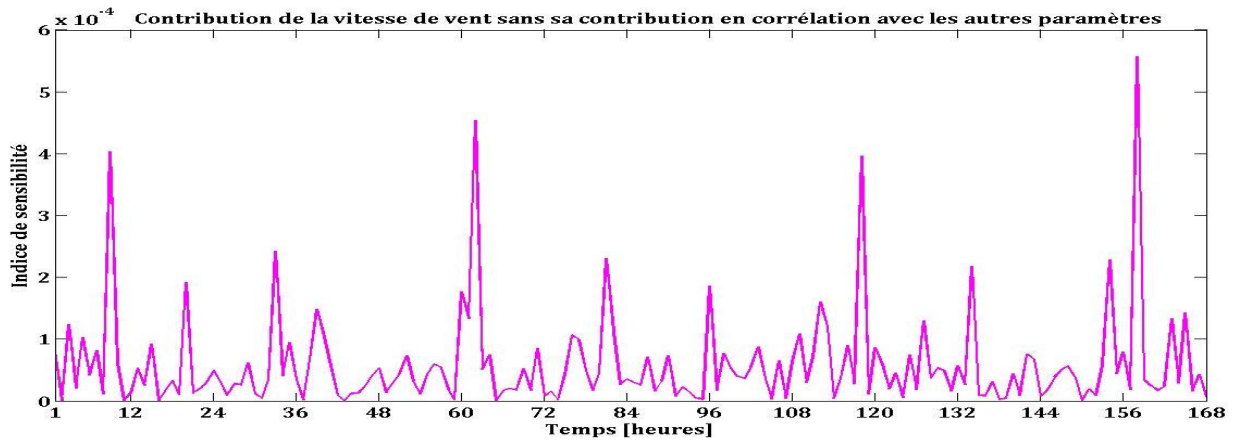


Figure 58. Dynamique de la contribution de la vitesse du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été)

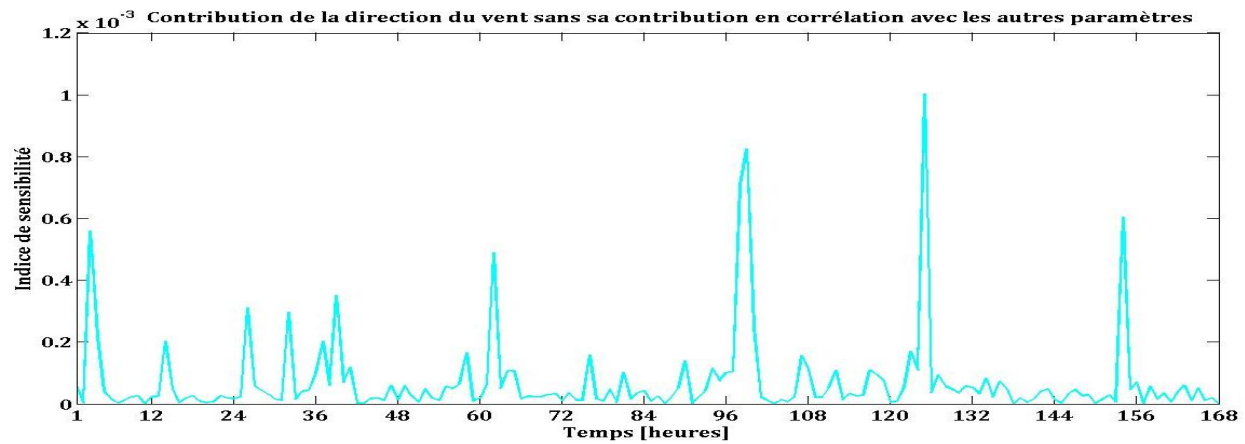


Figure 59. Dynamique de la contribution de la direction du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (été)

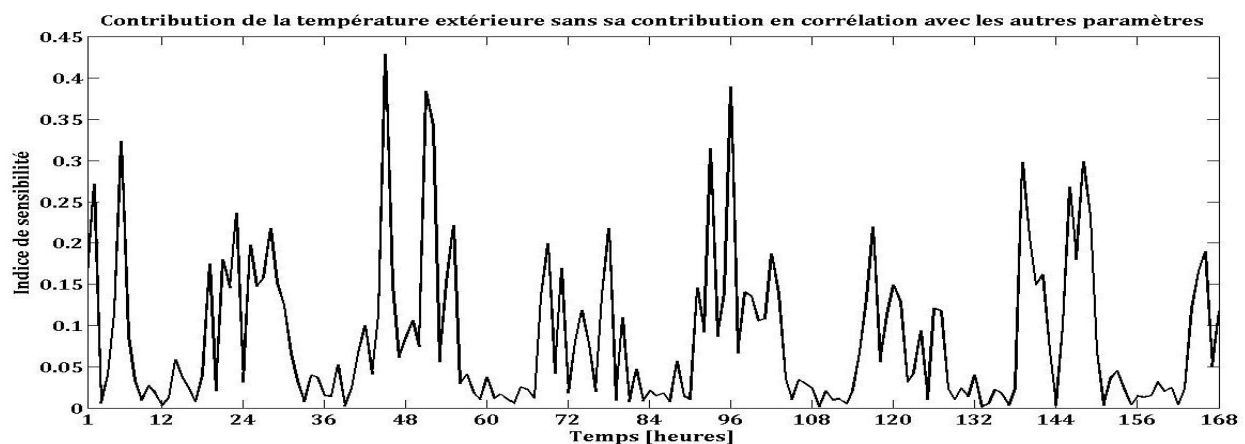


Figure 60. Dynamique de la contribution de la température de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver)

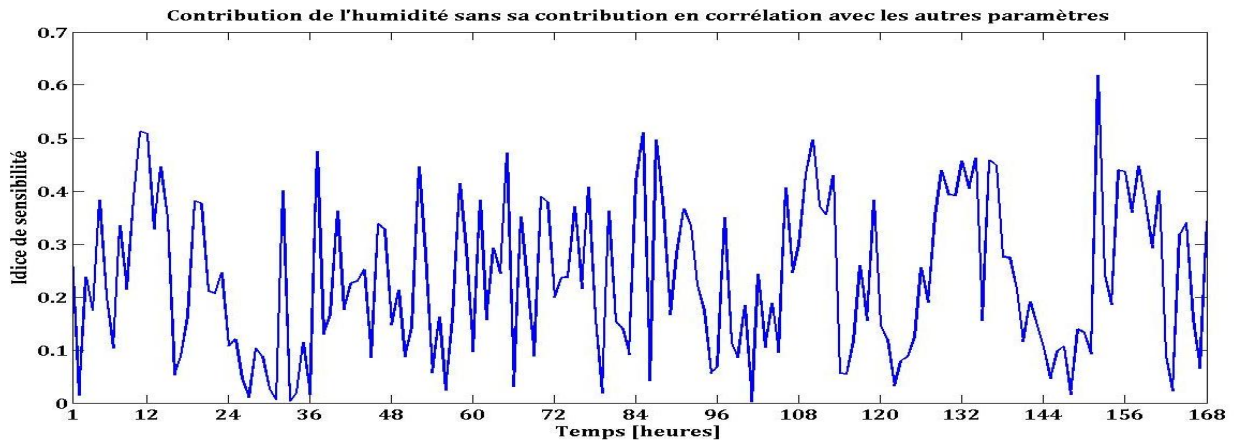


Figure 61. Dynamique de la contribution de l'humidité relative de l'air extérieur sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver)

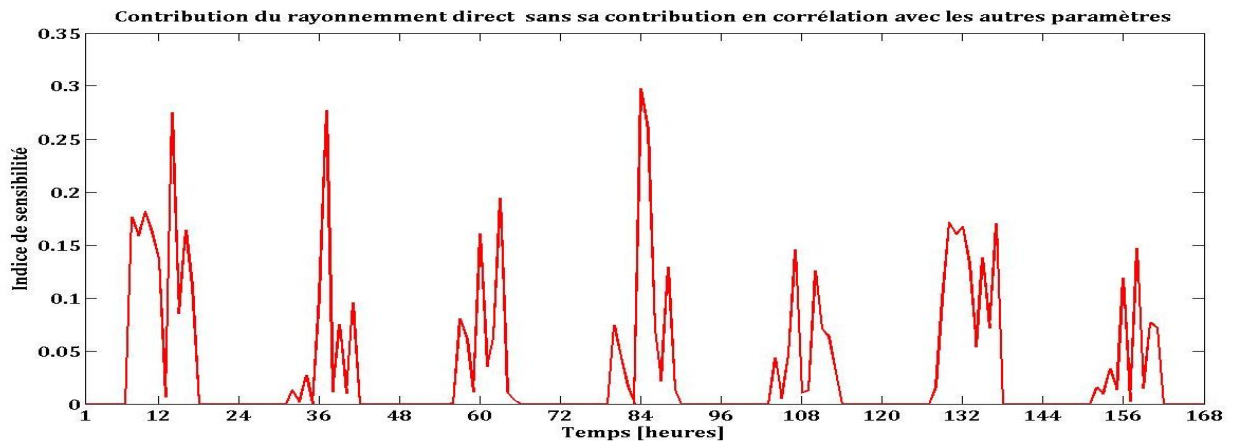


Figure 62. Dynamique de la contribution du rayonnement direct sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver)

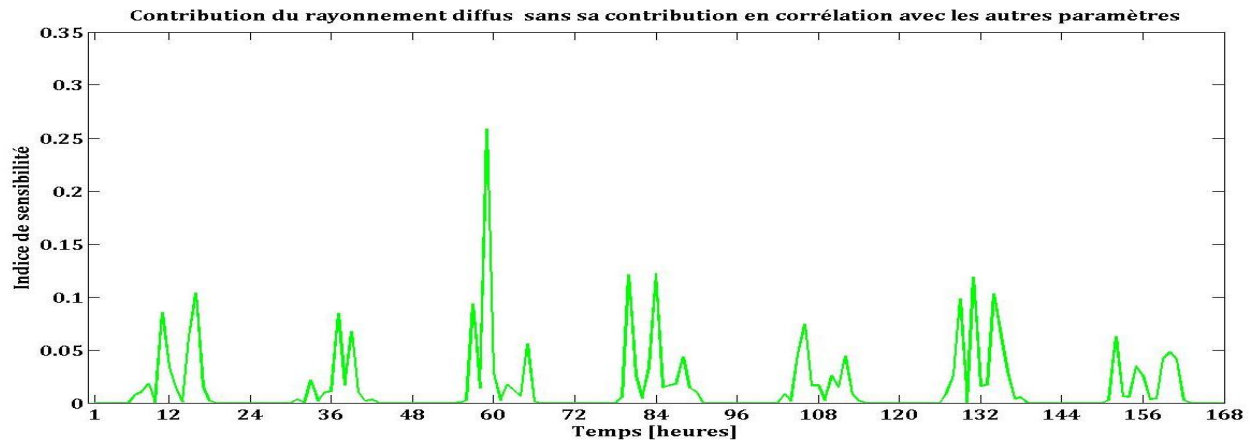
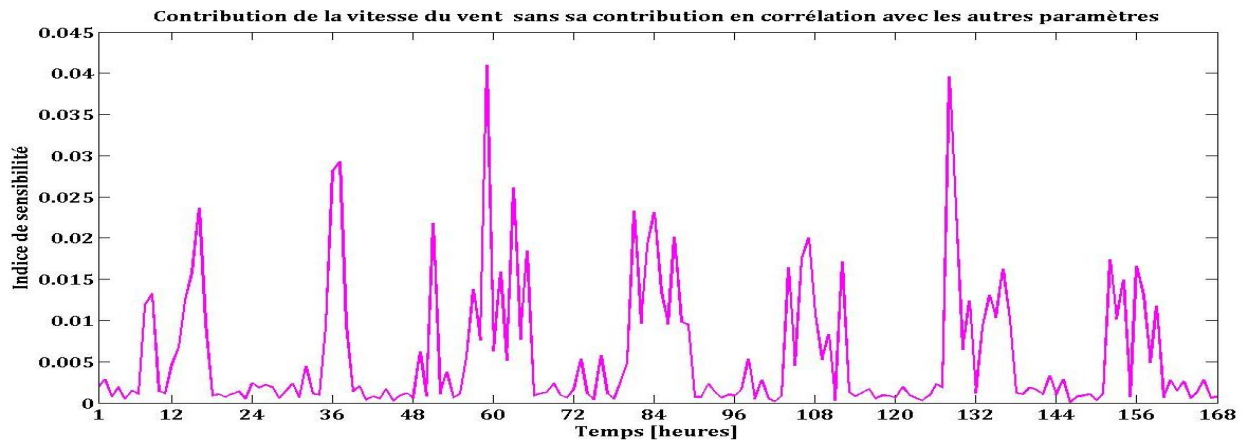
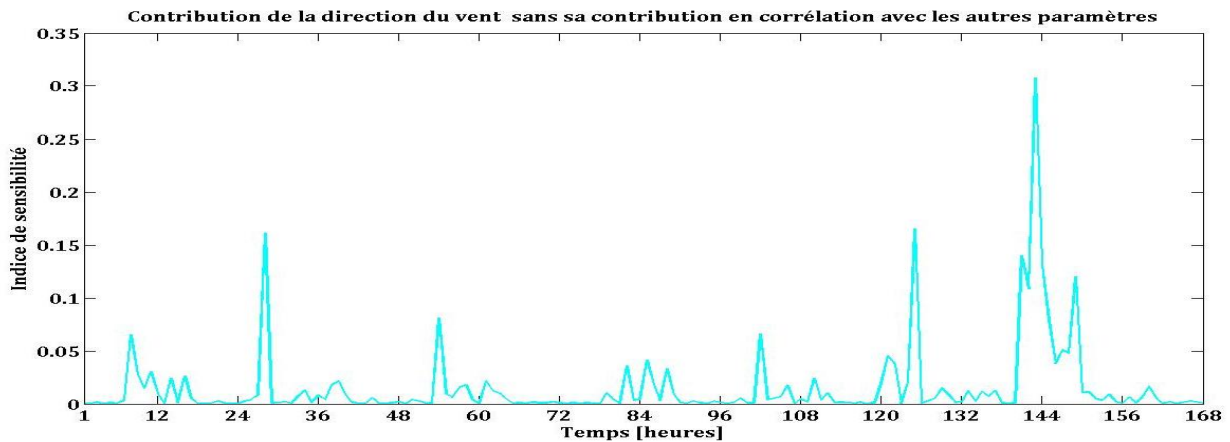


Figure 63. Dynamique de la contribution du rayonnement diffus sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver)



**Figure 64. Dynamique de la contribution de la vitesse du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver)**



**Figure 65. Dynamique de la contribution de la direction du vent sans sa contribution en corrélation avec les autres paramètres (hiver)**

### c. Contributions totales

---

Les figures 66 jusqu'à 71 montrent la dynamique des contributions totales de chaque paramètre pendant la saison chaude. Celle pendant la saison froide est donnée par les figures 72 jusqu'à 77.



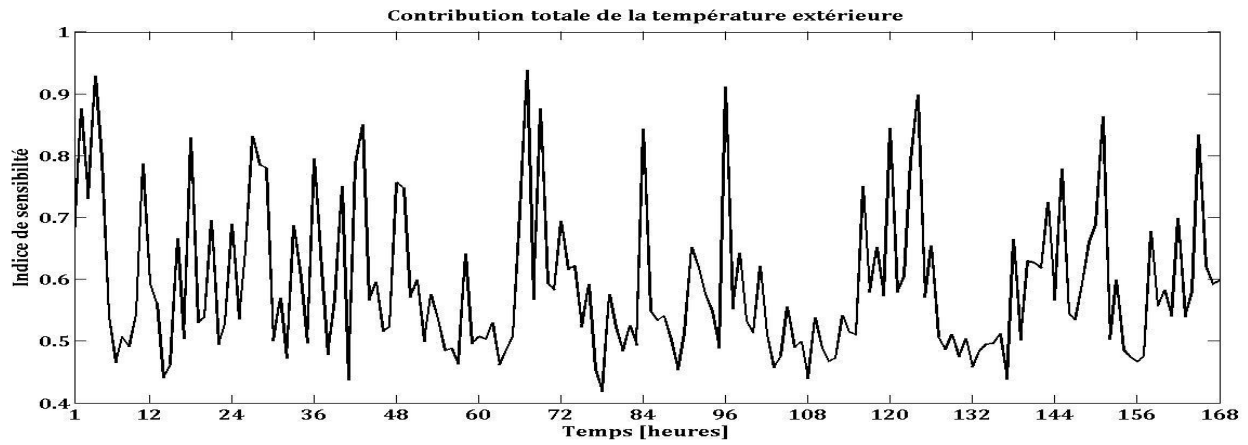


Figure 66. Dynamique de la contribution totale de la température de l'air extérieur (été)

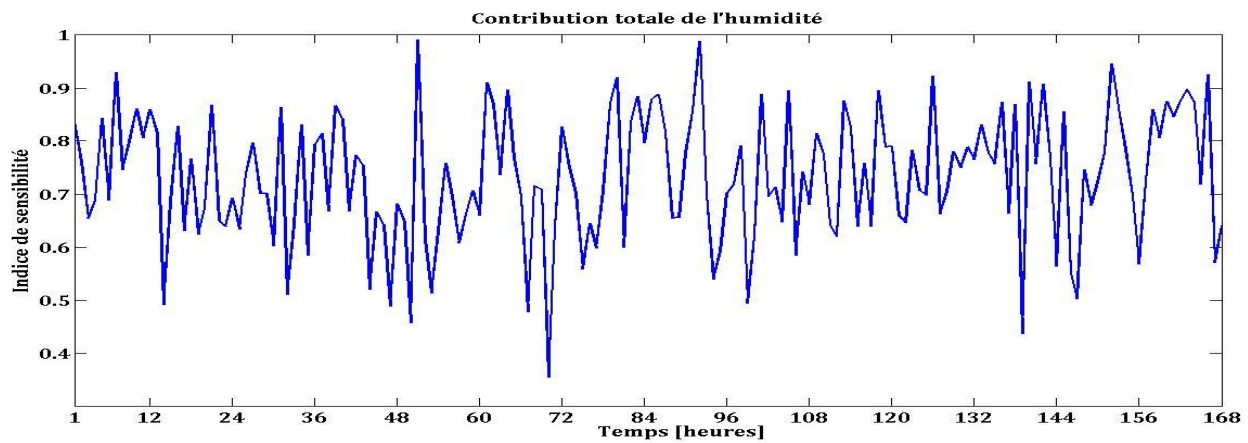


Figure 67. Dynamique de la contribution totale de l'humidité relative de l'air extérieur (été)

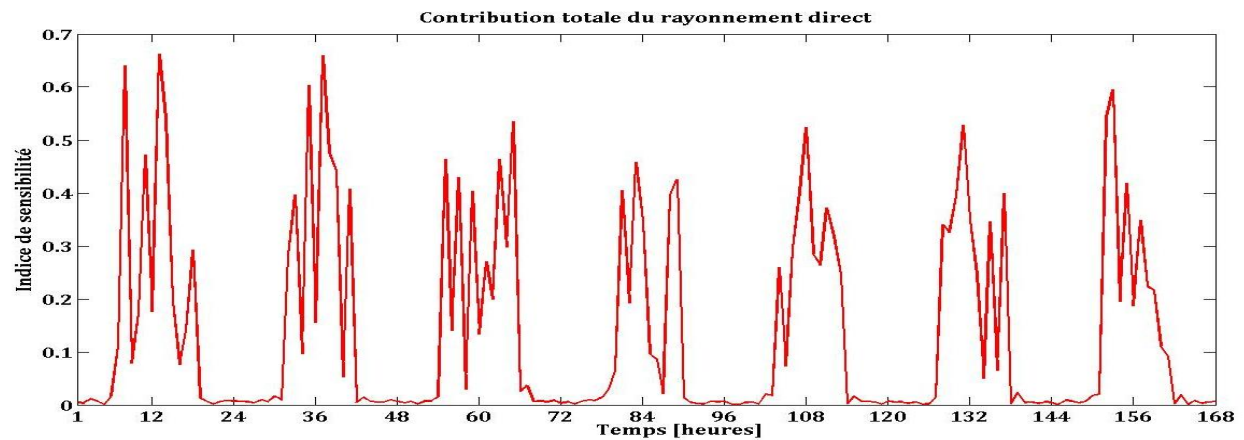


Figure 68. Dynamique de la contribution totale du rayonnement direct (été)

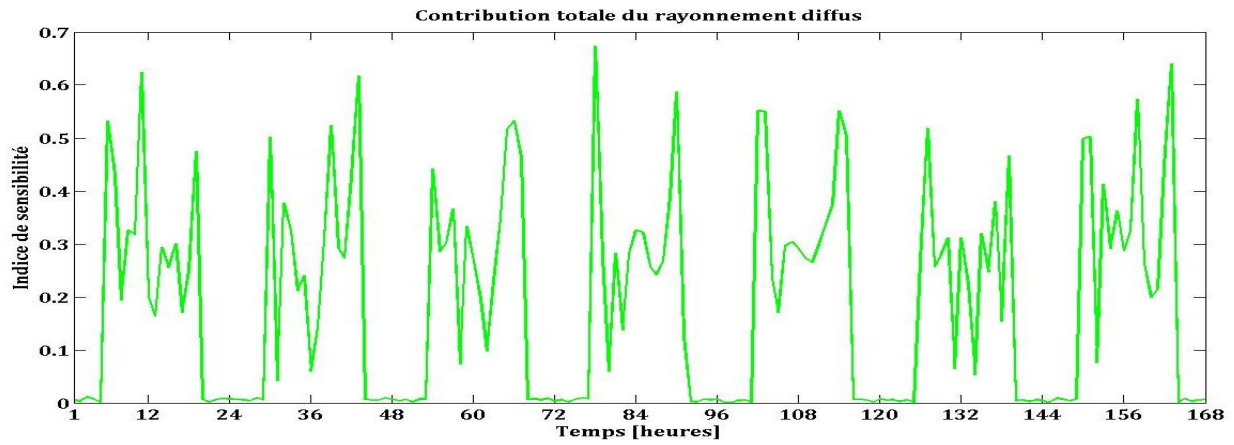


Figure 69. Dynamique de la contribution totale du rayonnement diffus(été)

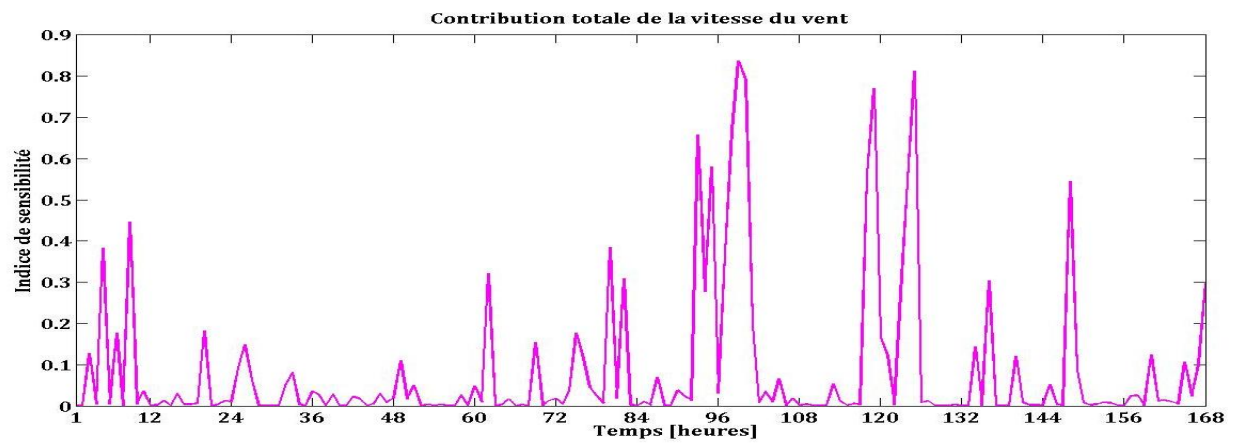


Figure 70. Dynamique de la contribution totale de la vitesse du vent (été)

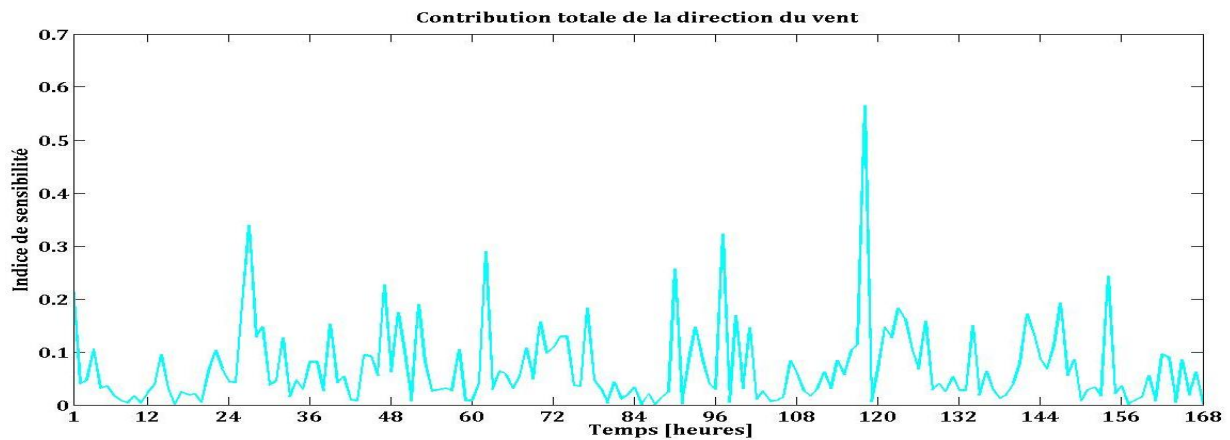


Figure 71. Dynamique de la contribution totale de direction du vent (été)

1. Semaine typique de la saison froide

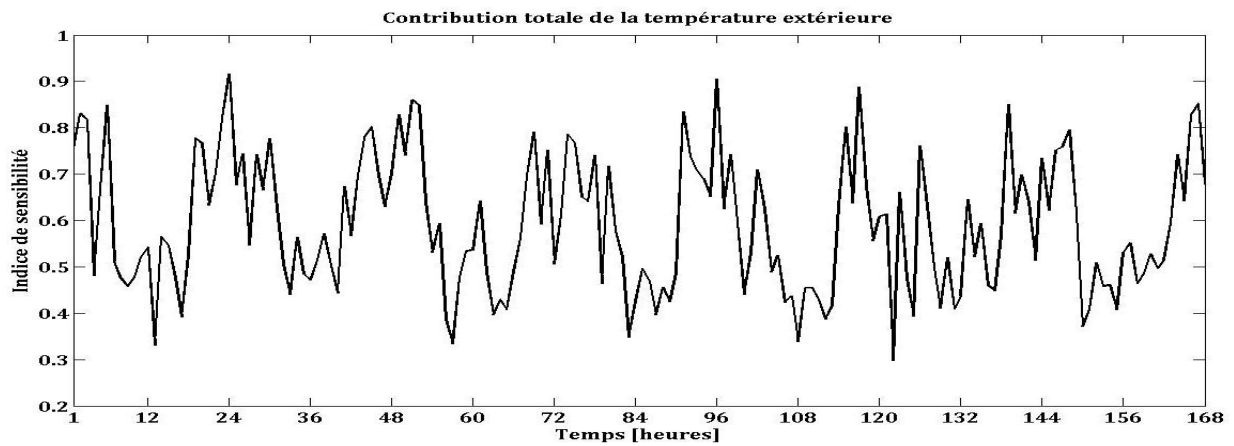


Figure 72. Dynamique de la contribution totale de la température de l'air extérieur (hiver)

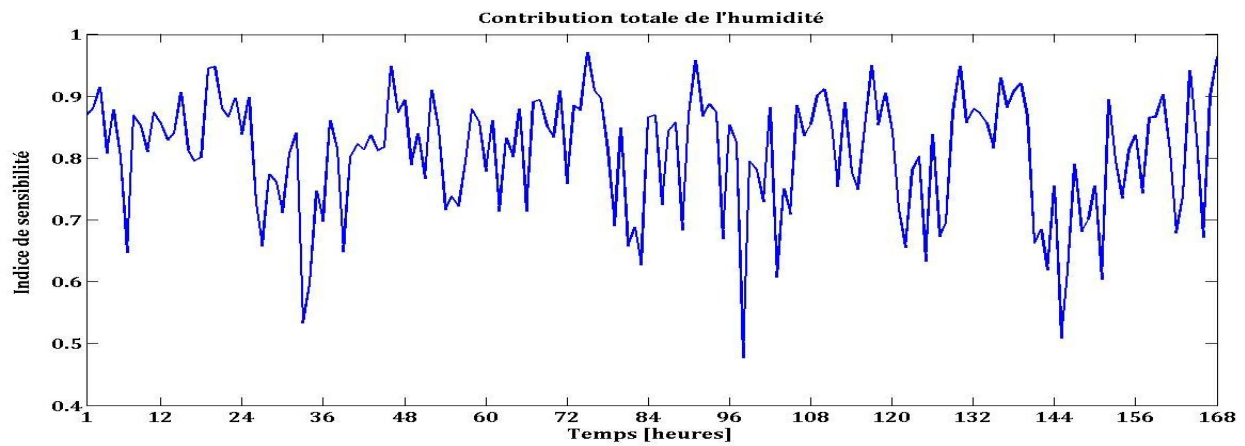


Figure 73. Dynamique de la contribution totale de l'humidité relative de l'air extérieur (hiver)

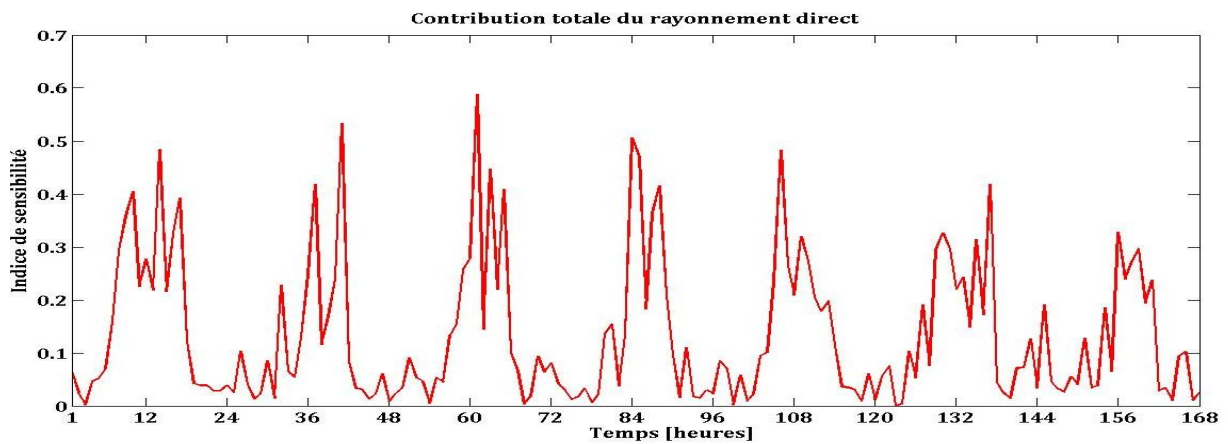


Figure 74. Dynamique de la contribution totale du rayonnement direct (hiver)

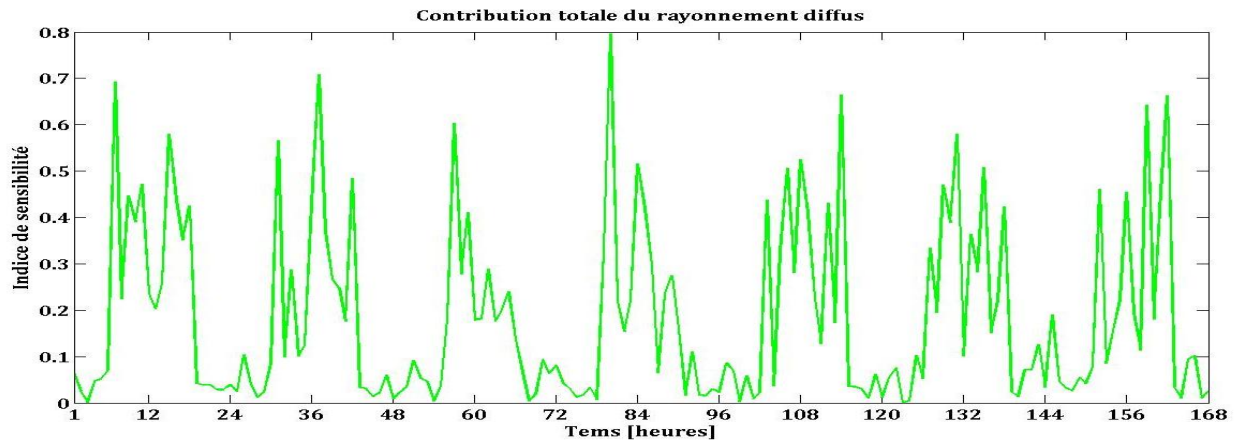


Figure 75. Dynamique de la contribution totale du rayonnement diffus(hiver)

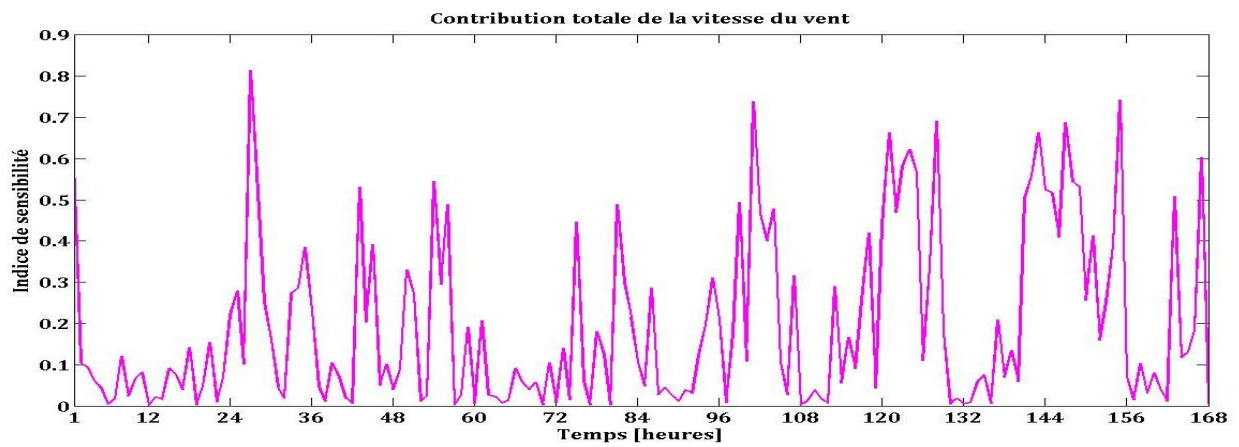


Figure 76. Dynamique de la contribution totale de la vitesse du vent(hiver)

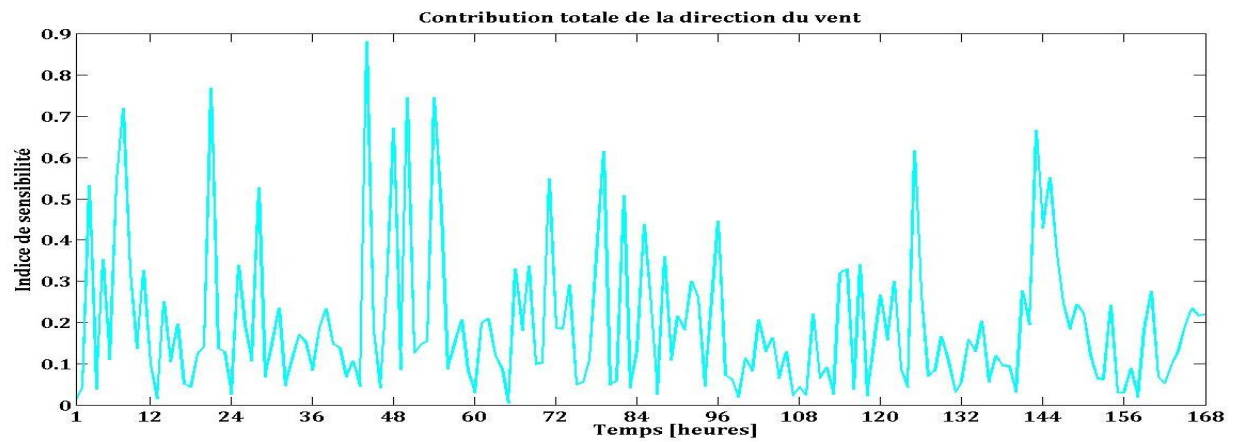


Figure 77. Dynamique de la contribution totale de la direction du vent(hiver)

Pour les trois contributions, contribution marginale, contribution sans la contribution en corrélation avec les autres paramètres et la contribution totale, une variation périodique des indices de sensibilité des six sollicitations est constatée.

Pour la température de l'air extérieur, ses contributions sont plus élevées pendant les nuits et diminuent pendant les jours.

Quant à l'humidité relative, une légère variation périodique de ses contributions à la dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment est observée. Les contributions de l'humidité relative de l'air sont plus fortes la nuit et diminuent légèrement le jour.

Pour les rayonnements direct et diffus, leurs contributions sont importantes pendant les jours et diminuent considérablement durant les nuits. Ceci est logique puisque pendant les nuits, il n'y a pas d'ensoleillement.

Les figures 78 et 79 montrent l'évolution des sommes des contributions en corrélation et les sommes des contributions sans les contributions en corrélation avec les autres paramètres. Une complémentarité entre les deux courbes est constatée. Comme les contributions marginales sont égales aux sommes des contributions en corrélation et des contributions sans les contributions en corrélation, elles sont alors quasi-constantes.

Les sommes des contributions en corrélation sont plus importantes pendant les jours tandis que celles des contributions sans les contributions en corrélation sont plus importantes durant les nuits.

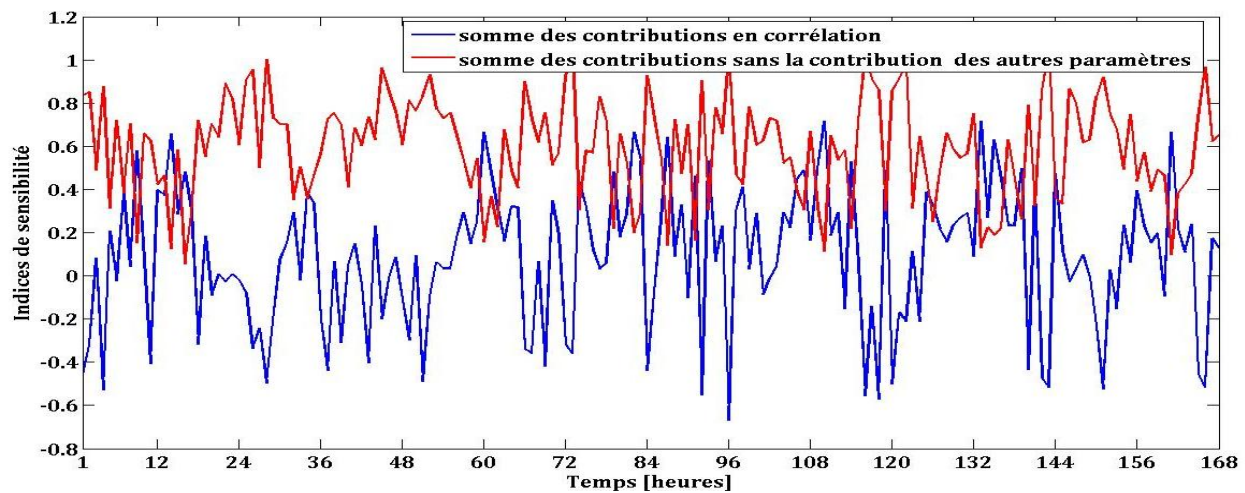


Figure 78. Dynamique des sommes des contributions en corrélation et sans la corrélation (été)

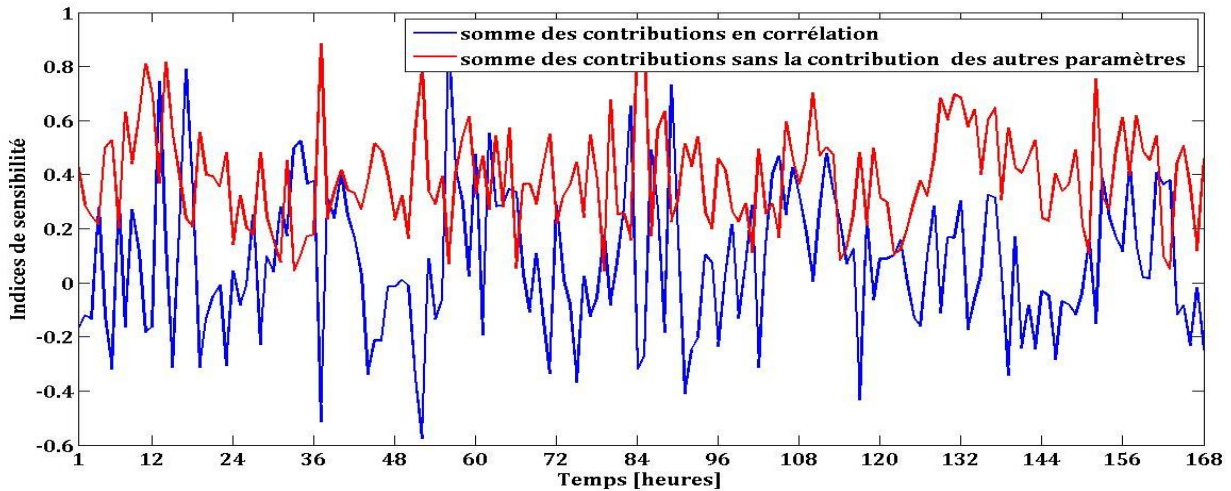


Figure 79. Dynamique des sommes des contributions en corrélation et sans la corrélation (hiver)

### 3.2 Conclusion

L'identification des paramètres météorologiques responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment est faite à l'aide d'une analyse de sensibilité. Aussi, une méthode d'analyse de sensibilité globale, qui tient compte des corrélations entre ces paramètres, basée sur la construction d'un métamodèle est proposée. Ce métamodèle utilise le développement en polynômes de chaos. Ainsi, la température et l'humidité relative de l'air extérieur sont les paramètres responsables de la variabilité de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment typique des hautes terres malgaches. Les autres paramètres comme les rayonnements direct et diffus, la direction et la vitesse du vent, influent également sur le confort hygrothermique grâce à leurs corrélations avec ces deux paramètres les plus importants.

## Conclusion générale et perspectives

---

Le confort hygrothermique se définit par la sensation que ressent chaque individu par rapport à la température et l'humidité. L'étude s'est focalisée sur l'analyse de la dispersion de l'ambiance intérieure dans un bâtiment typiquement malagasy, plus particulièrement, des hautes terres.

Des démarches pour permettre la mise en évidence de la dispersion de l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment et aussi pour identifier les paramètres responsables de cette dispersion sont développées.

Ces démarches ont permis :

- La modélisation, à partir d'une analyse bioclimatique, des différentes zones de contrôle potentiel (zone de confort, zone de contrôle potentiel pour les saisons froides et chaudes) pour la ville d'Antananarivo en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant. Ainsi, pour obtenir un confort hygrothermique, les températures de l'air ambiant dans les locaux doivent être comprises entre  $19,5^{\circ}\text{C}$  et  $24,8^{\circ}\text{C}$ , et l'air ambiant doit avoir un taux d'humidité relative entre 30% et 80%.
- La modélisation, en utilisant le moteur de calcul EnergyPlus, d'un bâtiment typique des hautes terres. Aussi, une dispersion de l'ambiance à l'intérieur du bâtiment est perçue.
- L'application de la méthode d'analyse de sensibilité pour des entrées dynamiques et corrélées qui est basée sur la décomposition de la variance. La construction du métamodèle ANOVA utilise le développement en polynômes de chaos. Ainsi, une méthode d'analyse de sensibilité globale pour des entrées corrélées est proposé.
- La création des échantillons de données météorologiques compatibles avec la méthode d'analyse de sensibilité appliquée et cohérents avec les données météorologiques de référence IWEC est faite. Ainsi, une méthode de génération de données météorologiques compatibles avec la méthode

d'analyse de sensibilité globale et cohérentes avec les données météorologiques de référence est présentée.

Les résultats ont montrés que :

- Parmi les paramètres météorologiques prédominants, la température et l'humidité relative de l'air extérieur sont les paramètres les plus influents sur l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment des hautes terres.
- Les autres paramètres tels que les rayonnements direct et diffus, la direction et la vitesse du vent influent peu sur le confort hygrométrique. Cependant, leurs influences ne sont pas négligeables à cause de leurs corrélations et interactions avec la température et l'humidité de l'air extérieur.

Cette recherche ouvre un certain nombre de perspectives qui pourraient être développées. Entre autres, nous pouvons citer :

- **La réglementation thermique des bâtiments à Madagascar** : les outils présentés dans cette thèse peuvent être utilisés pour la réglementation thermique des bâtiments. En effet, c'est lors de la phase de construction que les meilleures techniques d'économie d'énergie peuvent être prises en compte. Le choix de ces techniques doivent être justifiés et validés par des simulations.
- **Le bâtiment à énergie zéro** : Les résultats de l'analyse de l'influence de la variabilité des données météorologiques sur l'ambiance à l'intérieur d'un bâtiment typiquement Malagasy montre que la température et l'humidité relative de l'air extérieur sont les paramètres les plus influents sur le confort hygrothermique. En effet, la réduction de l'influence de ces deux paramètres peut se faire en appliquant une isolation des parois à partir des matériaux endogènes. La validation des techniques passives pour réduire l'influence de ces deux paramètres peuvent être effectuée en utilisant les outils exposés dans cette thèse.
- **Le bâtiment à énergie positive** : Les outils présentés dans cette thèse peuvent être utilisés pour la conception d'un bâtiment à énergie positive en augmentant l'influence des rayonnements solaires (direct et diffus). Ceci



peut se faire en utilisant des matériaux à forte inertie thermique. Cependant, l'efficacité et l'efficacité de ces matériaux doivent être validées.



## Références bibliographiques

---

- [1] T. A. Mara, "Contribution à la validation globale d'un logiciel de simulation thermo-aéraulique du bâtiment: Proposition d'un nouveau outils d'aide à la validation," Université de la Réunion, 2000.
- [2] J. Goffart, E. Wurtz and T. A. Mara, "Analyse de sensibilité sur les paramètres dynamiques en physique du bâtiment," Université de Savoie, 2012.
- [3] O. Rakoto Joseph and T. A. Mara, "Applications de l'analyse de sensibilité de modèles en thermique de l'habitat," Université d'Antananarivo & Université de La Réunion, 2006.
- [4] J. Goffart, "Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour des entrées temporelles," Université de Grenoble, 2013.
- [5] P. Lavigne, P. Brejon and P. Fernandez, Architecture climatique: une contribution au développement durable. TOME1: Base physique, Aix en Provence, 1994.
- [6] US Department of Energy, "[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_utilities.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_utilities.cfm)," [Online]. [Accessed Décembre 2013].
- [7] P. O. Fanger, "Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation," ASHRAE, 1967.
- [8] P. O. Fanger, "Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering," Danish Technical Press, 1970.
- [9] A. P. Gagge, J. A. Stolwijk and Y. Nish, "An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response", " ASHRAE, 1970.
- [10] A. P. Gagge, A. P. Fobelets and L. G. Berlund, "A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment," ASHRAE Trans, 1986.
- [11] T. J. Doherty and E. Arens, "Evaluation of the Physiological Bases of Thermal Comfort Models," 1988.

- [12] Fountain, E. Marc, Huizenga and Charlie, "A Thermal Sensation Prediction Tool for Use by the Profession," 1997.
- [13] F. C. Houghten and C. P. Yagloglou, "Determining equal comfort lines," J Am Soc Heat Vent Engrs, 1923.
- [14] H. M. Vernon, "The measurement of radiant heat in relation to human comfort," J.Industrial Hygiene, 1932.
- [15] C. P. Yagloglou and D. Minard, "Control of heat casualties at military centers," AMA Archives of Industrial Health, 1957.
- [16] C. E. Wislow, L. P. Herrington and A. P. Gagge, "Physiological reactions to environmental temperature," Am J of Physiology, 1937.
- [17] A. F. Dufton, "Equivalent temperature and its measurement," B R Technical Paper, 1932.
- [18] T. Bedford, "Equivalent temperature, what it is, how it's measured," Heating, Piping, Air conditioning, 1950.
- [19] T. Bedford, "Warmth factor in comfort at work," Med Res Council, Industrial Health Research Board, 1936.
- [20] A. Missenard, "Théorie simplifié du thermomètre resultant," Chauffage et Ventilation, 1935.
- [21] C. G. Webb, "An analysis of some observations of thermal comfort in an equatorial climate," Brit J of Industrial Medicine, 1959.
- [22] Bureau of Indian Standards, "Handbook of functional requirements of buildings (other than industrial buildings)," 1987.
- [23] D. H. Lee, "Proprioclimates of man and domestic animals," Climatology: Reviwes of research, 1958.
- [24] M. Ionides, J. Plummer and P. A. Siple, "Report from the climatology and environment protection section," Office of Quatermaster General (US), 1945.
- [25] B. Mc Ardle, "Prediction of physiological effect of warm and hot environments," Med Res Council, 1947.
- [26] H. S. Belding and T. F. Hatch, "Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains," Am J Heat Pip Air Cond, 1955.

- [27] D. H. Lee and A. Henschel, "Evaluation of thermal environment in shelters," trans US dpt of health Educ&welfare, 1963.
- [28] B. Givoni, "Estimation of the effect of climate on man: developping a new thermal index," Technion Haifa, 1963.
- [29] B. Givoni, "Man, climate and architecture," Elsevier, 1969.
- [30] P. O. Fanger, "Thermal comfort," Keiger, Florida, 1982.
- [31] B. Givoni, L'homme, l'architecture et le climat, Moniteur, 1978.
- [32] S. Szokolay, Environmental science handbook for architects and builder, The construction press, 1980.
- [33] D. Gauzin-Muller, L'architecture écologique, Le Moniteur, 2002.
- [34] N. C. D. Center, "Test Reference Year," U.S. Department of Commerce, 1976.
- [35] N. C. D. Center, "Typical Meteorological Year User's manuel: Hourly Solar Radiation—Surface Meteorological Observations," U.S. Departement of Commerce, 1981.
- [36] L. W. Crow, "Weather year for energy calculations," ASHRAE, 1984.
- [37] A. Saltelli, K. Chan and E. M. Scott, "Variance based methods," Probability and Statistics, 2000.
- [38] B. Bettonvil et J. P. Kleijnen, «Searching for important factor in simulation modesl with many factors: Sequential bifurcation,» European Journal of operational reasearch, 1997.
- [39] F. Campolongo and R. Braddock, "The use of graph theory in the sensitivity analysis of model output: a second order screening method," Reliability Engineering & System Safety, 1999.
- [40] A. M. Deana and S. M. Lewis, "Comparison of group screening strategies for factorial experiments," Computational Statistics & Data Analysis, 2002.
- [41] M. D. Morris, "Input screening: Finding teh important model inputs on a budget," Reliability Engineering & System Safety, 2006.
- [42] I. M. Sobol, "Sensitivity estimates for nonlinearar mathematical models," Mathematical Modelling and Computational Experiments, 1993.
- [43] H. Hoeffding, "A class of statistics with asymptotically norma distribution,"

Annals of Mathematical Statistics, 1948.

- [44] B. Efron and C. Stein, "The jackknife estimate of variance," *The Annals of Statistics*, 1981.
- [45] T. Homma and A. Saltelli, "Importance measures in global sensitivity analysis of non linear models," *Reliability Engineering and System Safety*, 1996.
- [46] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto and S. Tarantola, "Variance based sensitivity analysis of model output Design and estimator for the total sensitivity index," *Computer Physics Communications*, 2010.
- [47] R. I. Cukier, C. M. Fortuin, K. E. Shuler, A. G. Petschek and J. H. Shaibly, "Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients.I.Theory," *Journal of Chemical Physics*, 1973.
- [48] N. Murata, S. Yoshizawa and S. Amari, "A criterion for determining the number of parameters in an artificial neural network model," *Artificial Neural Networks*, 1991.
- [49] O. Le Maitre, M. T. Reagan, H. N. Najm and O. M. Knio, "A stochastic projection method for fluid flow:II," *Random Process*, 2002.
- [50] R. G. Ghanem and P. D. Spanos, "Stochastic Finite Elements : A Spectral Approach," Springer Verlag, 1991.
- [51] C. Soize and R. Ghanem, "Physical systems with random uncertainties : Chaos representations with arbitrary probability measure," *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2004.
- [52] N. Wiener, "The homogeneous chaos," *American Journal of Mathematics*, 1938.
- [53] R. H. Cameron and W. T. Martin, "The orthonormal development of non-linear functionals in serie of Fourier-Hermite functionals," *Annals of Mathematics*, 1947.
- [54] D. Xiu and G. E. Karniadakis, "A new stochastic approach to transient heat conduction modeling with uncertainty," *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 2003.
- [55] P. L. Liu and A. D. Kiureghian, "A multivariate distribution models with

- prescribed marginals and covariances," *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1986.
- [56] H. S. Li, Z. Z. Lü and X. K. Yuan, "Nataf transformation based point estimate method," *Chinese Science Bulletin*, 2008.
- [57] Y. Noh, K. K. Choi and L. Du, "Reliability-based design optimization of problems with correlated input variables using a Gaussian copula," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009.
- [58] S. Hamza, F. Anstett-Collin, R. Kiébré and M. Basset, "Analyse de sensibilité basée sur les polynômes de chaos pour des modèles de type boîte noire," *Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, 2012.
- [59] H. G. Mathies and A. Keese, "Galerkin methods for linear and non-linear elliptic stochastic partial differential equations," *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2005.
- [60] M. A. Tatang, W. W. Pan, R. G. Prin and G. J. Mc Rae, "An efficient method for parametric uncertainty analysis of numerical geophysical model," *Journal Geophysics Research*, 1998.
- [61] W. Li, Z. Lu and D. Zhang, "Stochastic analysis of unsaturated flow with probabilistic collocation method," *Water Resources Research*, 2007.
- [62] S. Huang, S. Mahadevan and R. Rebba, "Collocation based stochastic finite element analysis for random field problems," *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2007.
- [63] B. Sudret, "Global sensitivity analysis using chaos expansions," *Reliability Engineering and System Safety*, 2008.
- [64] G. Blatman and B. Sudret, "Efficient computation of global sensitivity indices using sparse polynomials chaos expansions," *Reliability Engineering and System Safety*, 2010.
- [65] T. A. Mara and S. Tarantola, "Variance-based sensitivity indices for models with dependent inputs," *Reliability Engineering and System Safety*, 2012.
- [66] N. J. Higham, "Computing the nearest correlation matrix - A Problem from finance," *The University of Manchester*, 2002.
- [67] M. D. McKay, R. J. Beckman and H. J. Conover, "A comparison of three

methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code," *Technometrics*, 1979.

- [68] R. L. Iman and W. J. Conover, "A distribution free approach to inducing a rank correlation among input variables," *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 1982.
- [69] E. M. Sheuer and D. S. Stoller, "On the generation of normal random vectors," *Technometrics*, 1962.





# Annexes

## Annexe 1 : Input Data File du bâtiment type

---

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS : BUILDING =====

Building,

Batiment,            !- Name  
 0.0,                 !- North Axis {deg}  
 Suburbs,            !- Terrain  
 0.04,               !- Loads Convergence Tolerance Value  
 0.4,                 !- Temperature Convergence Tolerance Value {deltaC}  
 FullInteriorAndExterior, !- Solar Distribution  
 25,                 !- Maximum Number of Warmup Days  
 ;                    !- Minimum Number of Warmup Days

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS : SITE :LOCATION =====

Site :Location,

MDG\_Antananarivo.670830\_IWEC, !- Name  
 -18.78,             !- Latitude {deg}  
 47.46,             !- Longitude {deg}  
 3.0,                !- Time Zone {hr}  
 1276;              !- Elevation {m}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS : SIZINGPERIOD :WEATHERFILEDAYS =====

SizingPeriod :WeatherFileDays,

Typical hot week,    !- Name  
 2,                   !- Begin Month  
 12,                  !- Begin Day of Month  
 2,                   !- End Month  
 18,                  !- End Day of Month  
 Monday,             !- Day of Week for Start Day  
 Yes,                 !- Use Weather File Daylight Saving Period  
 Yes;                !- Use Weather File Rain and Snow Indicators

SizingPeriod :WeatherFileDays,

Extreme hot week,    !- Name  
 3,                   !- Begin Month  
 19,                  !- Begin Day of Month  
 3,                   !- End Month  
 25,                  !- End Day of Month  
 Monday,             !- Day of Week for Start Day  
 Yes,                 !- Use Weather File Daylight Saving Period  
 Yes;                !- Use Weather File Rain and Snow Indicators

## SizingPeriod :WeatherFileDays.

Typical cold week,    !- Name  
 7,                    !- Begin Month  
 8,                    !- Begin Day of Month  
 7,                    !- End Month  
 14,                   !- End Day of Month  
 Monday,             !- Day of Week for Start Day  
 Yes,                 !- Use Weather File Daylight Saving Period  
 Yes;                 !- Use Weather File Rain and Snow Indicators

## SizingPeriod :WeatherFileDays.

Extreme cold week,    !- Name  
 7,                    !- Begin Month  
 29,                   !- Begin Day of Month  
 8,                    !- End Month  
 4,                    !- End Day of Month  
 Monday,             !- Day of Week for Start Day  
 Yes,                 !- Use Weather File Daylight Saving Period  
 Yes;                 !- Use Weather File Rain and Snow Indicators

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS : SITE :GROUNDTEMPERATURE :BUILDINGSURFACE =====

## Site :GroundTemperature :BuildingSurface.

18.3,                 !- January Ground Temperature {C}  
 18.2,                 !- February Ground Temperature {C}  
 18.3,                 !- March Ground Temperature {C}  
 18.4,                 !- April Ground Temperature {C}  
 20.1,                 !- May Ground Temperature {C}  
 22.0,                 !- June Ground Temperature {C}  
 22.3,                 !- July Ground Temperature {C}  
 22.5,                 !- August Ground Temperature {C}  
 22.5,                 !- September Ground Temperature {C}  
 20.7,                 !- October Ground Temperature {C}  
 18.9,                 !- November Ground Temperature {C}  
 18.5;                 !- December Ground Temperature {C}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS : MATERIAL =====

## Material,

BRIQUE,             !- Name  
 Rough,             !- Roughness  
 0.11,                !- Thickness {m}  
 0.69,                !- Conductivity {W/m-K}  
 1500,                !- Density {kg/m3}  
 950,                 !- Specific Heat {J/kg-K}  
 0.9,                 !- Thermal Absorptance  
 0.6,                 !- Solar Absorptance  
 0.6;                 !- Visible Absorptance

## Material,

TOLE 75-100,	!- Name
Smooth,	!- Roughness
0.00075,	!- Thickness {m}
45.28,	!- Conductivity {W/m-K}
7824,	!- Density {kg/m <sup>3</sup> }
500,	!- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,	!- Thermal Absorptance
0.75,	!- Solar Absorptance
0.75;	!- Visible Absorptance

## Material,

ENDUIT CIMENT,	!- Name
Rough,	!- Roughness
0.01,	!- Thickness {m}
1.65,	!- Conductivity {W/m-K}
2400,	!- Density {kg/m <sup>3</sup> }
900,	!- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,	!- Thermal Absorptance
0.6,	!- Solar Absorptance
0.6;	!- Visible Absorptance

## Material,

PORTE BOIS,	!- Name
MediumSmooth,	!- Roughness
0.04,	!- Thickness {m}
0.15,	!- Conductivity {W/m-K}
608,	!- Density {kg/m <sup>3</sup> }
1630,	!- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,	!- Thermal Absorptance
0.8,	!- Solar Absorptance
0.8;	!- Visible Absorptance

## Material,

DALLE BETON,	!- Name
MediumRough,	!- Roughness
0.15,	!- Thickness {m}
1.95,	!- Conductivity {W/m-K}
2240,	!- Density {kg/m <sup>3</sup> }
900,	!- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,	!- Thermal Absorptance
0.7,	!- Solar Absorptance
0.7;	!- Visible Absorptance

## Material,

CARRELAGE,        !- Name  
 MediumSmooth,     !- Roughness  
 0.02,            !- Thickness {m}  
 3.5,             !- Conductivity {W/m-K}  
 2800,            !- Density {kg/m3}  
 1000,            !- Specific Heat {J/kg-K}  
 0.9,             !- Thermal Absorptance  
 0.58,            !- Solar Absorptance  
 0.58;            !- Visible Absorptance  
 0.005,           !- Thickness {m}  
 0.15,            !- Conductivity {W/m-K}  
 608,             !- Density {kg/m3}  
 1630,            !- Specific Heat {J/kg-K}  
 0.9,             !- Thermal Absorptance  
 0.8,             !- Solar Absorptance  
 0.8;             !- Visible Absorptance

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS : WINDOWMATERIAL :SIMPLEGLAZINGSYSTEM =====

## WindowMaterial :SimpleGlazingSystem,

SIMPLE VITRAGE 4mm,   !- Name  
 6.57,            !- U-Factor {W/m2-K}  
 0.858,           !- Solar Heat Gain Coefficient  
 0.898;           !- Visible Transmittance

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS : CONSTRUCTION =====

## Construction,

Plancher-chambre,    !- Name  
 PARKEX,            !- Outside Layer  
 DALLE BETON;        !- Layer 2

## Construction,

Plancher-sdb,        !- Name  
 CARRELAGE,          !- Outside Layer  
 DALLE BETON;        !- Layer 2

## Construction,

Mur-exterieur,       !- Name  
 ENDUIT CIMENT,      !- Outside Layer  
 BRIQUE,             !- Layer 2  
 BRIQUE,             !- Layer 3  
 BRIQUE,             !- Layer 4  
 ENDUIT CIMENT;      !- Layer 5

## Construction,

Mur-interieur,     !- Name  
ENDUIT CIMENT,     !- Outside Layer  
BRIQUE,            !- Layer 2  
BRIQUE,            !- Layer 3  
ENDUIT CIMENT;     !- Layer 4

## Construction,

Plafond,           !- Name  
VOLIGE;            !- Outside Layer

## Construction,

Toiture,           !- Name  
TOLE 75-100;       !- Outside Layer

## Construction,

Porte,             !- Name  
PORTE BOIS;        !- Outside Layer

## Construction,

FENETRE,           !- Name  
SIMPLE VITRAGE 4mm;   !- Outside Layer

## Annexe 2 : Données météorologiques de référence

### Statistics for MDG Antananarivo.670830 IWEC

**Location : ANTANANARIVO - MDG {S 18° 47'} {E 47° 28'} {GMT +3.0 Hours}**

- Elevation : 1276m above sea level,
- Standard Pressure at Elevation : 86906Pa,
- Data Source : IWEC Data,
- WMO Station 670830.

**Using Design Conditions from "Climate Design Data 2009 ASHRAE Handbook" :**

- If the design condition source is ASHRAE, the design conditions are carefully generated,
- from a period of record (typically 30 years) to be representative of that location and,
- be suitable for use in heating/cooling load calculations. If the source is not ASHRAE,
- please consult the referenced source for the reasoning behind the data.

### Monthly Statistics for Dry Bulb temperatures °C

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	29.5	29.3	29.4	28.6	26.0	26.1	22.9	23.5	27.5	28.8	29.8	29.0
Minimum	13.8	16.0	15.8	10.5	10.6	8.4	6.7	5.8	9.1	9.6	11.0	14.8
Daily Avg	20.8	20.6	21.0	19.5	17.4	15.4	14.4	14.6	16.7	18.7	20.8	20.4

- Maximum Dry Bulb temperature of 29.8°C on Nov 1,
- Minimum Dry Bulb temperature of 5.8°C on Aug 2.



**Monthly Statistics for Dew Point temperatures °C**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	19.2	19.0	19.0	19.5	15.9	22.8	13.2	17.1	15.7	18.0	18.9	19.0
Minimum	10.4	14.7	7.0	7.8	8.4	5.5	3.7	5.4	5.0	5.0	2.6	9.0
Daily Avg	16.7	17.2	16.4	15.2	13.1	11.6	9.7	10.1	11.4	12.3	13.3	15.8

— Maximum Dew Point temperature of 22.8°C on Jun 7,

— Minimum Dew Point temperature of 2.6°C on Nov 21.

**Monthly Statistics for Relative Humidity %**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	100	100
Minimum	37	45	25	36	34	37	33	34	33	25	22	33
Daily Avg	80	82	76	78	77	80	75	77	73	70	66	77

**Monthly Indicators for Precipitation/Moisture (kPa)**

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1.8	2.0	1.8	1.7	1.4	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.7

**Monthly Wind Direction % {N=0 or 360,E=90,S=180,W=270}**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
North	27	13	38	12	21	29	26	22	19	8	38	28
NorthEast	15	10	6	8	7	1	1	2	3	3	8	24
East	30	42	35	43	38	46	46	40	58	47	30	15
SouthEast	10	17	1	20	18	13	18	26	13	18	8	7
South	4	10	6	16	14	10	6	10	6	10	2	15
SouthWest	4	2	0	0	1	0	0	0	1	8	1	5
West	4	3	9	0	1	0	1	0	0	6	8	5
NorthWest	6	2	4	0	0	0	1	0	0	1	7	1

**Monthly Statistics for Wind Speed m/s**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Maximum	13.4	10.8	7.2	8.2	8.7	7.2	8.7	13.4	8.7	9.8	7.2	12.9
Minimum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Daily Avg	3.3	3.7	1.7	2.9	2.4	1.8	2.1	2.7	3.1	4.5	1.9	3.8

- Maximum Wind Speed of 13.4 m/s on Jan 4,
- Minimum Wind Speed of 0.0 m/s on Jan 1.

**Monthly Statistics for Solar Radiation (Direct Normal, Diffuse, Global Horizontal) Wh/m<sup>2</sup>**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Direct Avg	2567	1492	2660	2973	2795	2802	3453	3868	4675	4502	4266	2480
Direct Max	8325	4580	7329	7307	5518	7166	7077	7421	8108	8921	8938	7962
Diffuse Avg	3606	3728	3166	2620	2255	1946	1923	2157	2308	2860	3215	3713
Global Avg	5589	4916	5088	4558	3923	3528	3948	4633	5635	6281	6524	5663

- Maximum Direct Normal Solar of 8938 Wh/m<sup>2</sup> on Nov 20

**Monthly Calculated "undisturbed" Ground Temperatures\*\* °C**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.5 m	20.1	21.1	21.4	21.1	19.7	18.1	16.7	15.6	15.4	15.9	17.1	18.6
2.0 m	19.2	20.1	20.6	20.6	19.8	18.7	17.6	16.6	16.1	16.3	17.0	18.0
4.0 m	18.6	19.3	19.8	19.9	19.6	19.0	18.2	17.4	16.9	16.8	17.2	17.8

- \*\*These ground temperatures should NOT BE USED in the GroundTemperatures object to compute building floor losses.
- The temperatures for 0.5 m depth can be used for GroundTemperatures :Surface.
- The temperatures for 4.0 m depth can be used for GroundTemperatures :Deep.
- Calculations use a standard soil diffusivity of 2.3225760E-03 {m\*\*2/day}

**Climate type "Csb" (Köppen classification)\*\* :**

Mediterranean climate (dry warm summer, mild winter, lat. 30-45°S)

- \*\*Note that the Köppen classification shown here is derived algorithmically from the source weather data.
- It may not be indicative of the long term climate for this location.

**Climate type "3A" (ASHRAE Standards 90.1-2004 and 90.2-2004 Climate Zone)\*\* :**

Warm - Humid, Probable Köppen classification=Cfa, Humid Subtropical (Warm Summer)

- \*\*Note that the ASHRAE classification shown here is derived algorithmically from the source weather data.
- It may not be indicative of the long term climate for this location.

**Typical/Extreme Period Determination**

- Summer is Jan-Mar:

Extreme Summer Week (nearest maximum temperature for summer)

Extreme Hot Week Period selected : Mar 19 :Mar 25, Maximum Temp= 29.50°C,  
Deviation=| 7.588|°C

Typical Summer Week (nearest average temperature for summer)

Typical Week Period selected : Feb 12 :Feb 18, Average Temp= 20.81°C, Deviation=|  
0.055|°C

- Winter is Jul-Sep:

Extreme Winter Week (nearest minimum temperature for winter)

Extreme Cold Week Period selected : Jul 29 :Aug 4, Minimum Temp= 5.80°C,  
Deviation=| 7.485|°C

Typical Winter Week (nearest average temperature for winter)

Typical Week Period selected : Jul 8 :Jul 14, Average Temp= 15.20°C, Deviation=|  
0.074|°C

— Autumn is Apr-Jun:

Typical Autumn Week (nearest average temperature for autumn)

Typical Week Period selected : May 20 :May 26, Average Temp= 17.46°C, Deviation=|  
0.035|°C

— Spring is Oct-Dec:

Typical Spring Week (nearest average temperature for spring)

Typical Week Period selected : Oct 29 :Nov 4, Average Temp= 19.96°C, Deviation=|  
0.031|°C





INFLUENCE DE LA VARIABILITÉ DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES ET ANALYSE  
DE SENSIBILITÉ GLOBALE POUR DES ENTRÉES DYNAMIQUES ET CORRÉLÉES SUR LE  
CONFORT HYGROTHERMIQUE

## Résumé:

---

La modélisation des phénomènes physiques est toujours entachée de plusieurs contraintes qu'il convient d'évaluer. Les incertitudes observées sur le comportement d'un bâtiment sont expliquées principalement par les incertitudes dues aux paramètres dynamiques. L'objectif de ce travail est de développer une méthodologie pour quantifier les incertitudes dues aux paramètres météorologiques prédominantes en tenant compte de l'auto-corrélation de chaque paramètre et de la corrélation entre eux. Pour ce faire, une approche pour générer des données météorologiques par la méthode Latin Hypercube Sampling à partir du fichier source IWEC combinée avec la méthode d'Iman et Conover a été proposée. Après avoir vérifié la cohérence des échantillons générés, ils sont utilisés pour évaluer les incertitudes en vue de l'analyse de sensibilité du confort thermique. Les résultats ont montré que les incertitudes se rapportant à la sensation de confort sont dues principalement à la variabilité de la température et de l'humidité relative de l'air extérieure. Les rayonnements directs et diffus, la direction et de la vitesse du vent influent également à variabilité de l'ambiance intérieure grâce à leurs corrélations avec les deux paramètres les plus influents.

**Mots clés :** Confort hygrothermique, paramètres météorologiques, échantillonnage, analyse de sensibilité.

## Abstract:

---

Modeling physical phenomena is always tainted by a number of constraints to be evaluated. Uncertainties observed in the behavior of a building is explained mainly by uncertainties due to the dynamic parameters. The objective of this work is to develop a methodology to quantify the uncertainties due to prevailing meteorological parameters taking into account the autocorrelation of each parameter and the correlation between them. To do this, an approach to generating meteorological data by the method Latin Hypercube Sampling from the source file IWEC combined with the method of Iman and Conover was proposed. After checking the consistency of samples generated, they are used to assess uncertainties for the thermal comfort sensitivity analysis. The results showed that the uncertainties related to the feeling of comfort are mainly due to the variability of temperature and relative humidity of the outdoor air. Direct and diffuse radiation, direction and wind speed also affect variability in the indoor environment through their correlations with the two most influential parameters.

**Keywords :** Hygrothermal comfort, meteorological parameters, sampling, sensitivity analysis.

**Directeur :**

RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo,  
Professeur Titulaire

**Impétrant:**

RAKOTO Harry Angelo

**Co-encadreur :**

RAKOTO JOSEPH Onimihamina,  
Maitre de Conférences

**Contact:** (+)261 33 14 070 36, [irriangelo@yahoo.fr](mailto:irriangelo@yahoo.fr)

**Adresse:** Lot k7 192 Ivato Aéroport