

*Projet Tropiclim « Favoriser l'émergence  
de la climatisation efficace à La Réunion »*

**Tâche 1 : Apports de la simulation thermique  
dynamique au dimensionnement  
de la climatisation**

*Livrable 1.2*

04/02/2020

*rédigé par*  **ENERTECH**



**Le projet Tropiclim est lauréat du 11<sup>ème</sup> appel à projets du programme PACTE (Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Énergétique) intitulé « Améliorer la qualité de la construction dans les territoires ultra-marins ». Il a été cofinancé par l'Ademe Réunion et EDF Réunion.**

# Sommaire

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
1.1	RAPPEL DU CONTEXTE .....	3
1.2	OBJECTIFS .....	3
1.3	TERMINOLOGIE.....	4
<b>2</b>	<b>ANALYSE PRELIMINAIRE DU CLIMAT.....</b>	<b>5</b>
2.1	DONNEES METEOROLOGIQUES.....	5
2.2	DIAGRAMME SOLAIRE .....	5
2.3	CHARGES CLIMATIQUES .....	6
2.3.1	<i>Apports solaires .....</i>	<i>6</i>
2.3.2	<i>Ecart de température intérieur-extérieur .....</i>	<i>8</i>
2.3.3	<i>Apports d'humidité .....</i>	<i>9</i>
<b>3</b>	<b>METHODE D'ANALYSE DE SENSIBILITE DES BESOINS FRIGORIFIQUES .....</b>	<b>11</b>
3.1	GRANDEURS D'INTERET .....	11
3.1.1	<i>Avantages de la STD .....</i>	<i>11</i>
3.1.2	<i>Indicateurs retenus .....</i>	<i>11</i>
3.2	ANALYSE DE SENSIBILITE .....	12
3.2.1	<i>Plan d'expérience.....</i>	<i>13</i>
	Energie sensible .....	13
	Energie latente.....	15
3.2.2	<i>Méthodologie .....</i>	<i>16</i>
	Cas générique .....	16
	Cas d'études.....	18
<b>4</b>	<b>RESULTATS DES ANALYSES DE SENSIBILITE .....</b>	<b>19</b>
4.1	ANALYSE DE SENSIBILITE DU CAS GENERIQUE.....	19
4.1.1	<i>Contributions de référence .....</i>	<i>19</i>
	Pour le besoin sensible – parois.....	19
	Pour le besoin sensible – renouvellement d'air .....	20
	Pour le besoin latent.....	21
	Foisonnement .....	21
4.1.2	<i>Impact des variantes .....</i>	<i>27</i>
	Sur le besoin sensible.....	27
	Sur le besoin latent .....	31
4.2	ANALYSE DE SENSIBILITE DES CAS D'ETUDES .....	36
4.2.1	<i>Comparaison des météo .....</i>	<i>36</i>
4.2.2	<i>Impacts des variantes.....</i>	<i>37</i>
	Sur le besoin sensible.....	37
	Sur le besoin latent .....	42
4.3	CONCLUSIONS .....	43
<b>5</b>	<b>INDICATEURS DE DIMENSIONNEMENT .....</b>	<b>44</b>
5.1	METHODOLOGIE .....	44
5.1.1	<i>Démarche .....</i>	<i>44</i>
5.1.2	<i>Indicateur d'inconfort.....</i>	<i>44</i>
5.2	RESULTATS .....	45
5.2.1	<i>Cas simplifié.....</i>	<i>45</i>
5.2.2	<i>Cas d'étude .....</i>	<i>46</i>
5.3	CONCLUSIONS .....	49

# 1 Introduction

## 1.1 Rappel du contexte

L'optimisation de la climatisation des bâtiments en milieu tropical est un important levier pour réduire la consommation électrique et les émissions de gaz à effet serre, particulièrement à La Réunion du fait du contexte insulaire et de sa forte dépendance aux énergies fossiles pour la production électrique.

Les études de terrain montrent que les installations de climatisation sont généralement surdimensionnées. L'outil le plus précis à ce jour pour évaluer a priori les besoins de climatisation d'un bâtiment est la simulation thermique dynamique (STD). L'objectif global de cette sous-tâche est d'étudier les apports que pourrait apporter la STD pour le dimensionnement des installations centralisées de froid dans le tertiaire.

## 1.2 Objectifs

L'établissement des modèles de STD et l'interprétation des résultats sont complexes et délicats (nombreux paramètres à renseigner, souvent incertains ; choix des hypothèses ; nombreuses sorties ; etc.). En ce sens, pour fiabiliser leur utilisation, les objectifs de cette tâche sont :

1. d'identifier les paramètres sensibles du modèle, pour discriminer ceux nécessitant une attention particulière pour leur estimation de ceux pouvant prendre des valeurs par défaut ;
2. de définir des indicateurs, pour faciliter l'analyse, l'interprétation des résultats et le dimensionnement.

Le premier objectif vise à mieux estimer les grandeurs de dimensionnement pour éviter les surdimensionnements et fera l'objet des parties 3 et 4, tandis que le second cherche à définir de nouveaux indicateurs permettant potentiellement de réduire le dimensionnement usuel et fera l'objet de la partie 5.

Les résultats obtenus ont permis l'établissement d'un premier guide pour aider les bureaux d'études à établir des STD fiables et d'un second guide pour aider les maîtrises d'ouvrages à définir les variantes à étudier assurant un balayage suffisamment large des solutions. Ces guides sont joints en annexe de ce document.

### 1.3 Terminologie

Dans les travaux présentés dans la suite nous nous intéresserons uniquement à l'**énergie utile** délivrée par les systèmes de climatisation, c'est-à-dire à l'énergie frigorifique délivrée par les systèmes pour maintenir la température de consigne. On ne s'intéressera donc pas directement à l'énergie finale, généralement électrique, réellement consommée par les systèmes. Celle-ci peut toutefois être soit estimée à partir des résultats en utilisant les coefficients de performance des installations ou de façon détaillée via la STD. Dans la suite, l'utilisation du terme **énergie frigorifique** fera implicitement référence à l'énergie utile.

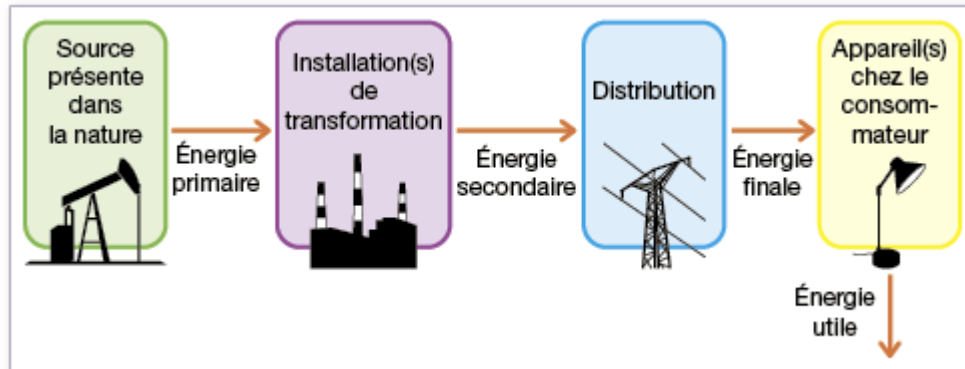


Figure 1.3 – Chaîne de transformation de l'énergie.

Afin que les résultats soient autant que possible généralisables, et donc indépendants des systèmes utilisés, nous avons cherché à nous rapprocher le plus possible de l'estimation des **besoins** du bâtiment, c'est-à-dire l'énergie théorique nécessaire pour maintenir le bâtiment à la température de consigne souhaitée.

Nous nous intéresserons à l'évolution de cette énergie utile au cours du temps, autrement dit à la puissance. Nous n'utiliserons pas le terme de courbe de charge pour désigner cette évolution temporelle car celui-ci est généralement utilisé pour l'énergie finale électrique, nous parlerons plutôt de **série temporelle des besoins**. Le terme **puissance** fera implicitement référence à la puissance utile moyenne estimée au pas de temps horaire.

Pour les bilans annuels et mensuels nous n'utiliserons pas le terme consommation, lui aussi réservé à l'énergie finale ou primaire et préférerons parler explicitement d'énergie **utile annuelle ou mensuelle**.

L'utilisation de systèmes de climatisation fait nécessairement apparaître une **énergie frigorifique latente** due à la condensation de l'eau contenue dans l'air au contact des organes froid. On ne peut pas estimer de besoins latents du bâtiment car cette énergie frigorifique latente est intrinsèquement liée à la présence des systèmes de climatisation et non au bâtiment lui-même, contrairement aux besoins sensibles (qui impactent la température). C'est en cela que l'estimation de l'énergie frigorifique totale (sensible plus latente) s'éloigne des besoins.

## 2 Analyse préliminaire du climat

Avant de s'intéresser aux besoins de froid, il est instructif d'étudier le climat afin d'avoir une idée des contributions des différentes grandeurs climatiques.

### 2.1 Données météorologiques

Les données météorologiques de Gillot issues de la base de données PERENE ont été utilisées dans l'ensemble des résultats génériques présentés dans ce document. Elles correspondent en effet à la météo de référence pour l'agglomération de Saint-Denis d'après le programme PERENE. La météo de Saint-Denis n'est effectivement pas adéquate car elle ne contient pas l'hygrométrie extérieure.

Ainsi, les résultats issus de ce rapport seront uniquement valables pour les zones littorales de faibles altitudes (inférieure à 400m) Z1 et Z2, qui regroupe tout de même près de 80% de la population de l'île.

### 2.2 Diagramme solaire

Les diagrammes solaires représentent l'évolution de la course du soleil au cours d'une année. Pour la localisation retenue, les diagrammes, pour un repère polaire et cartésien, sont les suivants<sup>1</sup> :

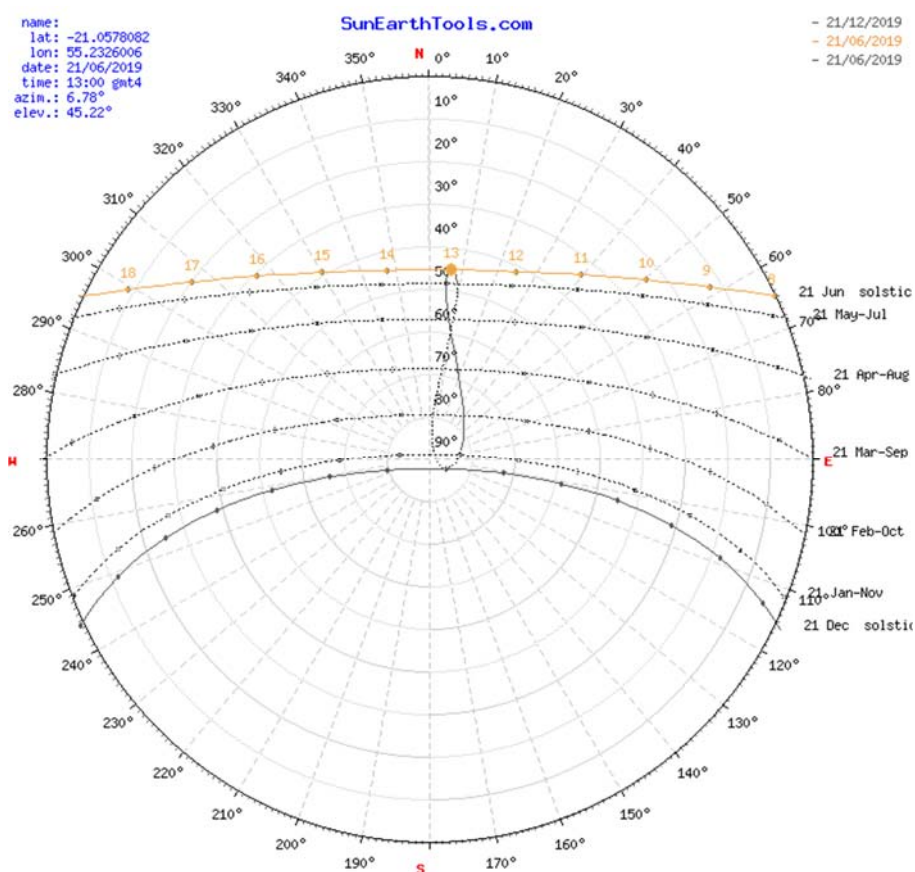


Figure 2.2.a – Diagramme solaire en coordonnées polaires.

<sup>1</sup> Obtenu avec le site <https://www.sunearthtools.com>, rubrique « la position du soleil ».

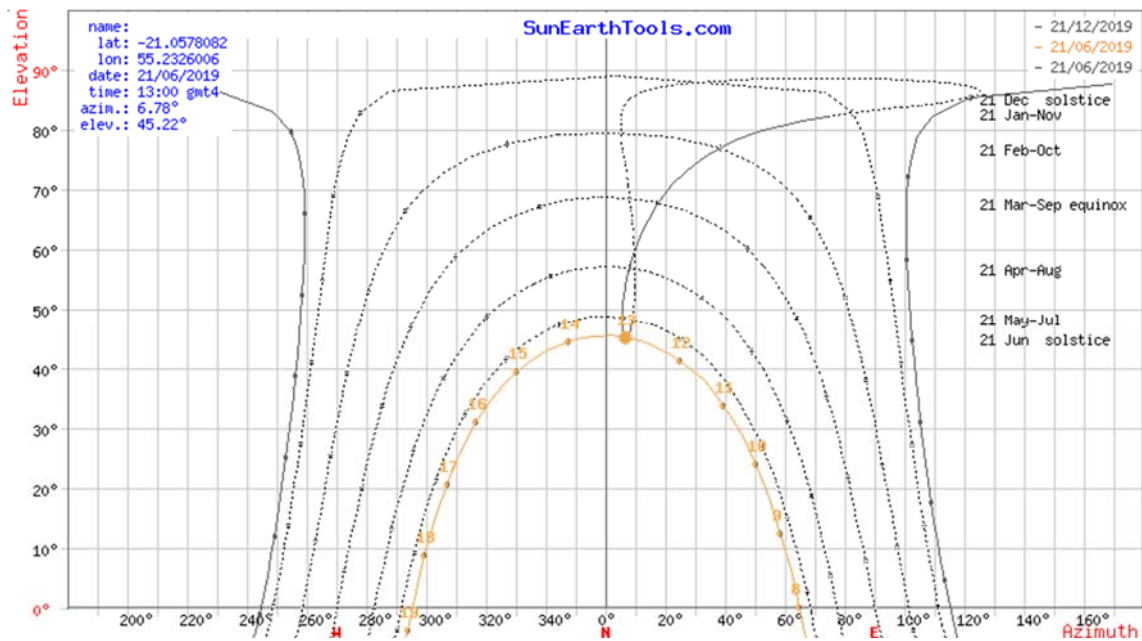


Figure 2.2.b – Diagramme solaire en coordonnées cartésiennes.

Etant situé en région tropicale dans l'hémisphère Sud, le soleil passe principalement au Nord en journée quasiment tout au long de l'année, sauf proche du solstice d'été australe où il passe ponctuellement au Sud. Sa course est proche d'un arc de cercle passant d'Est à l'Ouest par le zénith (rayons solaires incidents quasiment perpendiculaires aux façades Est puis Ouest le matin et le soir et au plan horizontal en milieu de journée).

### 2.3 Charges climatiques

Une part importante des besoins frigorifiques sont engendrés par les grandeurs climatiques. Les contributions de ces différentes sources de chaleur, et d'humidité pour la part latente, sont analysées ci-dessous.

#### 2.3.1 Apports solaires

Le tableau suivant donne les énergies solaires mensuelles incidentes aux parois selon leurs orientations. La part transmise à la zone s'estime en multipliant ces valeurs par le facteur solaire de la paroi considérée<sup>2</sup>. Pour donner des ordres de grandeur, le programme PERENE impose des facteurs solaires maximaux de 0,25 à 0,4 pour les parois vitrées selon leur orientation et de 0,02 à 0,05 pour les parois opaques (toiture ou murs).

Mois	Energie solaire mensuelle incidente (Wh/m <sup>2</sup> )				
	Vertical				Horizontal
	Nord	Sud	Est	Ouest	
Janvier	61 672	74 727	111 979	89 878	205 151
Février	57 393	54 137	105 810	68 510	161 388

<sup>2</sup> En supposant un régime statique.

Mars	91 336	52 601	123 499	75 895	184 493
Avril	123 803	42 955	114 308	81 244	169 282
Mai	154 579	38 124	104 037	75 789	160 557
Juin	153 735	32 484	88 101	68 191	140 288
Juillet	146 867	34 934	98 165	60 628	143 387
Août	128 711	40 232	96 374	75 773	159 069
Septembre	84 288	49 926	88 450	71 773	144 696
Octobre	73 532	60 587	93 670	79 780	164 337
Novembre	61 455	66 941	100 731	78 764	179 264
Décembre	64 323	85 370	121 412	90 137	199 820
Total	1 201 694	633 017	1 246 537	916 362	2 011 731

Figure 2.3.1.a – Energie solaire mensuelle incidente selon 5 orientations principales.

On observe que, pour une surface donnée, l'exposition la plus défavorable au besoin de froid est l'horizontale, suivi des parois verticales Est puis Ouest. À la différence des autres orientations, la paroi Nord reçoit plus d'énergie en dehors de la période estivale. Ces observations sont cohérentes avec la course du soleil vue précédemment.

L'apport plus important de l'orientation Est par rapport à l'orientation Ouest s'explique par une couverture nuageuse récurrente en fin de journée. En effet on observe sur les statistiques journalières que le flux direct diminue en fin de journée, lorsqu'il est incident à la face Ouest, alors que le flux diffus augmente.

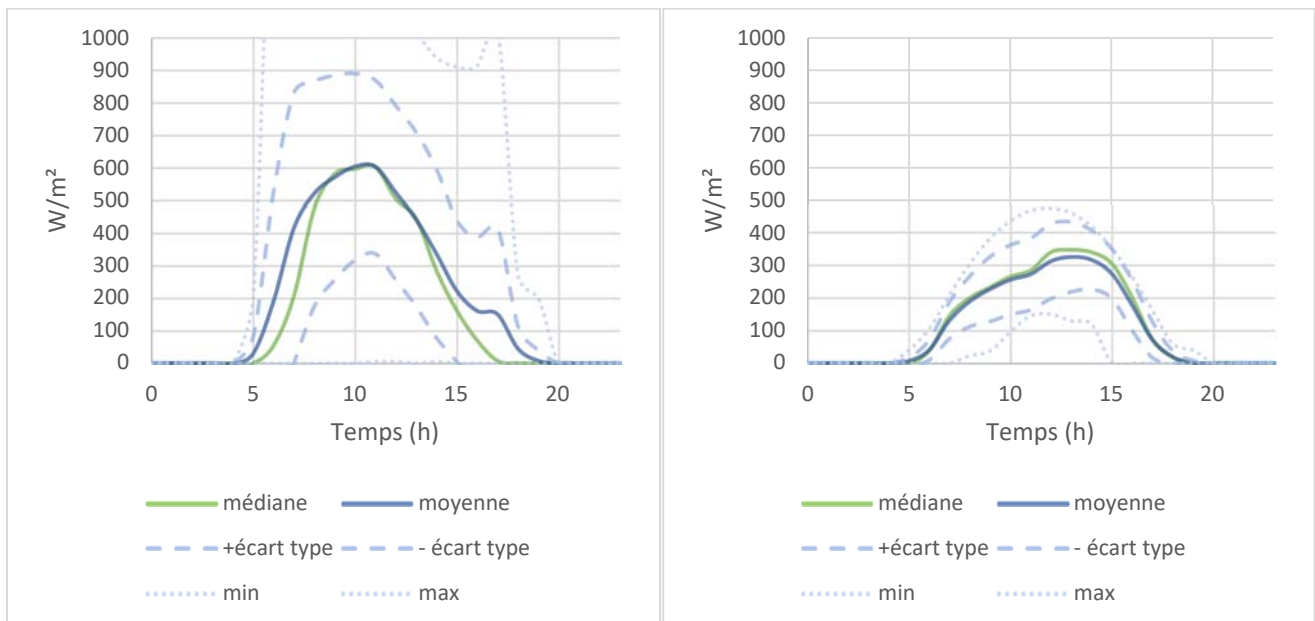


Figure 2.3.1.b – Statistiques journalières des flux solaires direct normal (à droite) et diffus horizontal (à gauche).

### 2.3.2 Ecart de température intérieur-extérieur

En plus des apports solaires, la température extérieure induit aussi des apports de chaleur via le renouvellement d'air et par conduction à travers les parois extérieures. Ceux-ci sont proportionnels à l'écart de température entre intérieur et extérieur<sup>3</sup>.

En supposant une température de consigne de 26°C, l'écart maximal de température entre intérieur et extérieur est de 6,6 °C.

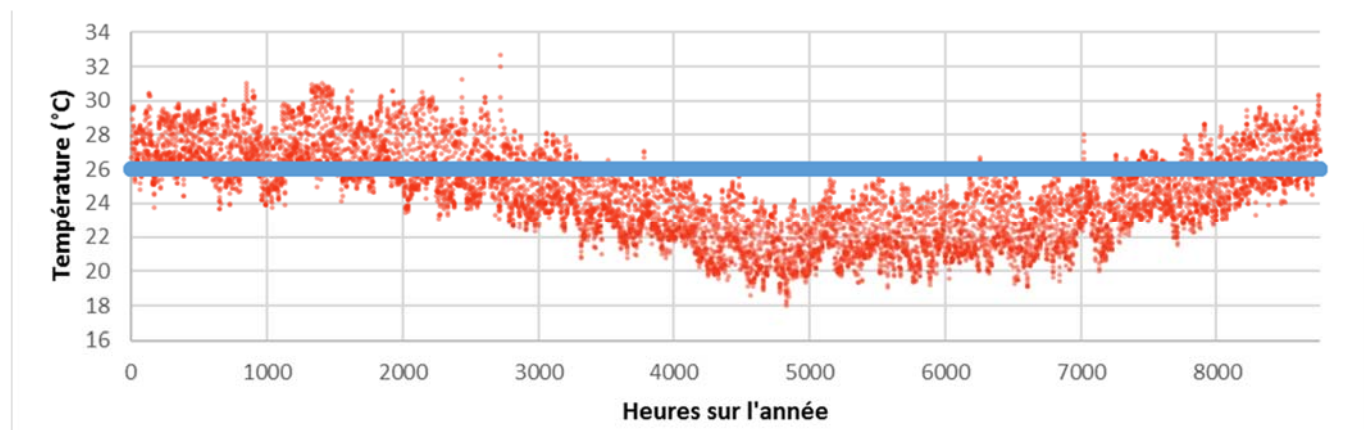


Figure 2.3.2.a – Evolution annuelle de la température de l'air extérieur.

En cumulé, lorsqu'il est positif (30% du temps, principalement en milieu de journée et en saison estivale), l'écart vaut 4254 °C.h. Le tableau suivant donne leur répartition par mois :

Mois	Degré-heures (°C.h)
Janvier	1000
Février	953
Mars	972
Avril	512
Mai	91
Juin	3
Juillet	0
Août	0
Septembre	3
Octobre	10
Novembre	108
Décembre	601

Figure 2.3.2.b – Bilan mensuel des écarts de températures entre intérieur et extérieur.

Les transferts d'énergie par conducto-convection associés (en Wh/m<sup>2</sup>) peuvent-être estimés en multipliant ces degré-heures par le coefficient de déperdition de parois exposées à l'extérieur (en W/m<sup>2</sup>/K).

<sup>3</sup> En supposant là aussi un régime statique.



Pour donner des ordres de grandeur, une paroi fortement déperditive (fenêtre simple vitrage) à un coefficient de déperdition de  $7 \text{ W/m}^2/\text{K}$ , et une paroi légèrement isolée (composition des toits décrite dans la suite) un coefficient de  $0,7 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Pour le renouvellement d'air en supposant un taux de renouvellement de  $0,6 \text{ vol/h}$  et une hauteur sous plafond de  $2,5 \text{ m}$ , le coefficient de déperdition équivalent est de  $0,5 \text{ W/K}$  par  $\text{m}^2$  de plancher.

On voit ainsi que l'énergie transmise par les parois vitrées par différence de température entre intérieur et extérieur (figure 2.3.2.b) est globalement inférieure d'un à deux ordres de grandeurs par rapports à l'énergie solaire transmise (énergie incidente de la figure 2.3.1.a multiplié par le coefficient d'absorption solaire compris entre 0 et 1). L'écart est plus faible pour les parois opaques, mais les apports solaires restent majoritairement dominant. Les apports solaires apparaissent donc plus contraignants que les apports conducto-convectifs.

### 2.3.3 Apports d'humidité

L'évolution annuelle de l'hygrométrie absolue extérieure met bien en évidence la saison sèche (hiver austral) et la saison humide (été austral), avec une hygrométrie absolue 1,5 fois plus importante l'été que l'hiver.

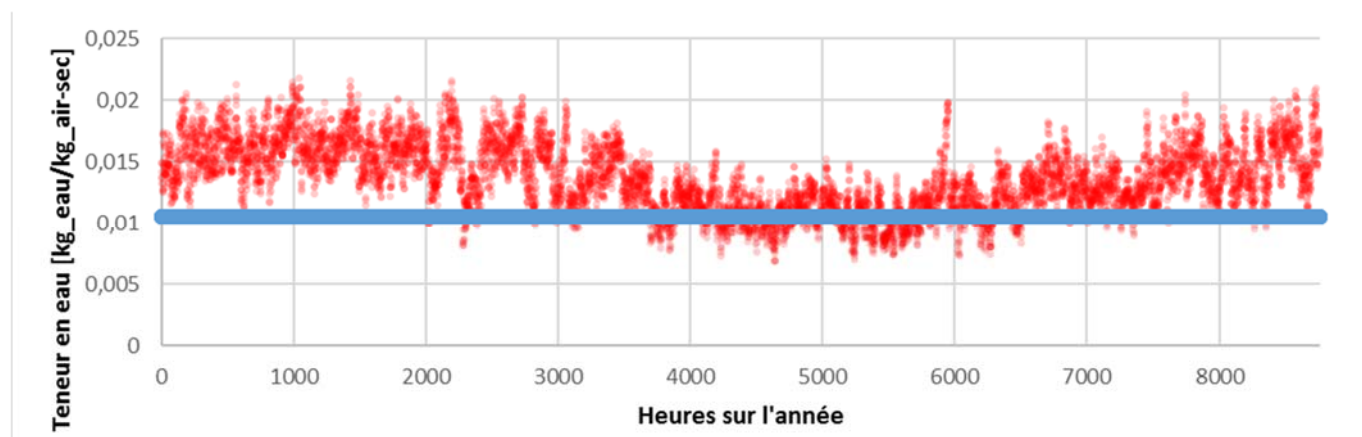


Figure 2.3.3.a – Evolution annuelle de la teneur en eau de l'air extérieur.

Dans les hypothèses de modélisation (voir rapport de modélisation en annexe), on considère qu'une personne dégage  $69 \text{ W}$  d'apports latents, soit  $110 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{h}$ .

Selon le diagramme de Givoni, à  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  la plage de confort est délimitée par une hygrométrie comprise entre 20 et 60 %. Pour une hygrométrie moyenne de 50 %, la teneur en eau est de  $10 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air-sec}}$ . La teneur en eau minimale et maximale de l'air extérieur est respectivement de 6 et  $22 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air-sec}}$ . Le débit de renouvellement d'air préconisé pour une personne par le programme PERENE pour la typologie bureaux est de  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dans le cas le plus défavorable, l'apport latent résultant du renouvellement d'air est de  $168 \text{ W}$ , soit  $268 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{h}$ . Ainsi, au cours des périodes les plus humides, les apports latents de pointe due au renouvellement d'air sont plus important que ceux dégagé par les occupants.

En conservant les hypothèses précédentes concernant les conditions internes et sous l'hypothèse d'une occupation et d'une ventilation continue (24h/24), les apports latents mensuels générés par le renouvellement d'air nécessaire à une personne sont donnés dans le tableau suivant.

Mois	Apports latents dû au renouvellement d'air [kWh/pers.]
Janvier	54
Février	57
Mars	55
Avril	49
Mai	36
Juin	12
Juillet	9
Août	6
Septembre	16
Octobre	28
Novembre	35
Décembre	49
Année	405

*Figure 2.3.3.b – Bilan mensuel des apports latents par renouvellement d'air pour une personne.*

## 3 Méthode d'analyse de sensibilité des besoins frigorifiques

La méthodologie retenue pour répondre au premier objectif présenté en introduction, à savoir discriminer les paramètres de modélisation influents, s'appuie sur une analyse de sensibilité dont le détail est présenté dans ce qui suit.

### 3.1 Grandeurs d'intérêt

La première étape d'une analyse de sensibilité consiste à définir la grandeur d'intérêt. La STD en offre un large choix et permet une analyse détaillée selon différents aspects de celle-ci.

#### 3.1.1 Avantages de la STD

Comme identifié dans la sous-tâche précédente<sup>4</sup>, les méthodes simplifiées de dimensionnement se basent sur l'estimation du besoin frigorifique sur la période la plus défavorisée (puissance maximale nécessaire). Cette période est définie a priori et peut s'avérer irréaliste ou non représentative.

La STD permet d'estimer ces besoins de façon bien plus détaillée, sur un pas de temps généralement horaire pendant une année complète, pour des données météorologiques représentatives du site considéré. De l'évolution de ces besoins, il est alors possible de calculer la monotone de puissance, à savoir, une courbe donnant les niveaux de puissance par ordre décroissant en fonction de leur occurrence cumulée d'apparition. Cette représentation permet de dimensionner plus finement les installations en se basant sur plusieurs périodes défavorables, elles-mêmes basées sur des données météorologiques représentatives.

De plus, la STD permet aussi de calculer plus précisément le foisonnement de la puissance maximale entre les différentes zones d'un bâtiment. Dans les méthodes simplifiées, le besoin maximal est calculé pour chaque zone selon ses propres conditions les plus défavorables. Celles-ci n'ayant pas forcément lieu au même moment, un coefficient dit de foisonnement est utilisé pour estimer le besoin maximal global à l'échelle du bâtiment afin de corriger les écarts dû au déphasage de ces maximums. La STD, en calculant les l'évolution temporelles de la puissance par zone, permet de calculer directement la puissance globale sans « artifice ».

Enfin, avec les méthodes simplifiées, la puissance frigorifique latente est estimée a priori en supposant une humidité relative intérieure constante. En réalité, l'humidité relative varie fortement selon les conditions intérieures et extérieures des zones. La STD, en simulant spécifiquement l'évolution de celle-ci, permet là aussi une estimation plus fiable.

En simulant de façon détaillée les évolutions temporelles des différentes grandeurs impactant le comportement hygro-thermique d'un bâtiment sur une période annuelle, la STD permet donc d'effectuer une étude détaillée et quasi-exhaustive de ces différentes variables.

#### 3.1.2 Indicateurs retenus

Les phénomènes liés au fonctionnement d'un système de climatisation étant de nature énergétique, la grandeur d'intérêt étudiée dans cette étude est restreinte au besoin frigorifique. Afin de fournir des informations relativement exhaustives permettant de mieux dimensionner les installations et de mieux appréhender les impacts des variantes étudiées, les indicateurs suivants ont été retenus :

---

<sup>4</sup> Voir rendu 1.1.

1. Le besoin annuel et mensuels (kWh/m<sup>2</sup>)
2. L'étendue de la période de climatisation (heures)
3. Le besoin horaire maximal (W/m<sup>2</sup>)
4. Les valeurs de la puissance dépassée respectivement 5, 10, 20 et 50 % du temps sur une année (resp. 438, 876, 1752 et 4380 h) en se basant sur la monotone de puissance.

L'énergie en question est l'énergie frigorifique utile totale (voir section 1.3 Terminologie), dont on distinguera, selon les besoins, la part sensible et latente.

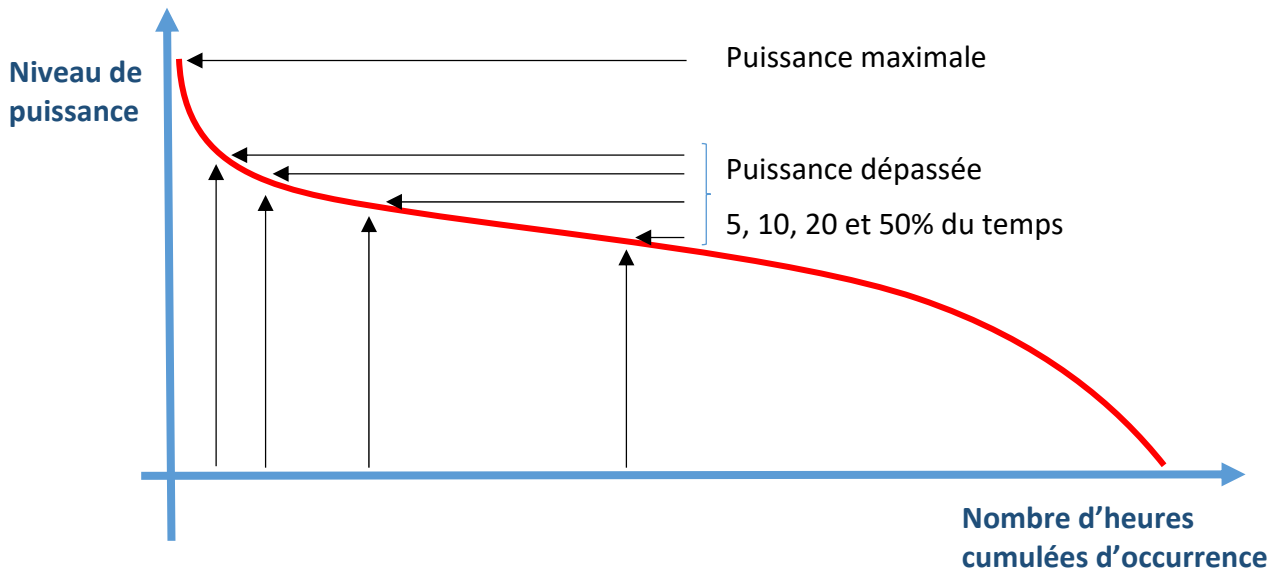


Figure 3.1.2 – Indicateurs liés à la monotone de puissance

Comme indiqué, les unités sont systématiquement ramenées par mètre carré de surface utile climatisée du bâtiment ou de parois exposées à l'extérieur, selon les cas (précisé dans la suite), pour faciliter les extrapolations à tout cas quelconque.

L'analyse de sensibilité qui suit quantifiera l'impact des différentes variantes de STD au regard de ces indicateurs.

### 3.2 Analyse de sensibilité

L'objectif de cette analyse de sensibilité est de faire ressortir les paramètres sensibles pour la modélisation de la climatisation en milieu tropical. Son but est double :

- D'une part de fiabiliser l'utilisation de la STD et ainsi de dimensionner au plus juste les installations de froid ; on cherchera à estimer au mieux les paramètres en question pour avoir des résultats plus fiables.
- D'autre part d'identifier les paramètres sur lesquels agir pour minimiser la puissance et la consommation de l'installation ; on veillera donc à tester des variantes sur ces paramètres pour chercher un optimum en conception/rénovation.

L'analyse de sensibilité s'intéresse à l'impact sur les résultats de la modification des paramètres d'un modèle. Un paramètre sera impactant pour un indicateur donné si sa modification entraîne une modification importante de la valeur de cet indicateur. Le plan d'expérience retenu dans la suite conduit à une analyse de sensibilité *locale* : on part d'un paramétrage d'origine -de référence-, et l'on fait varier

les paramètres un à un en revenant systématiquement au cas de référence. Le paramétrage d'origine est déduit de bâtiments jugés représentatifs du parc tertiaire réunionnais<sup>5</sup> (voir cas d'études dans la suite). Les paramètres varieront entre une valeur haute et basse, déterminées de façon réaliste selon les solutions courantes de conception envisageables.

N'étant pas régies par les mêmes phénomènes physiques, les énergies frigorifiques sensible et latente sont étudiées de façon distincte.

En tant qu'outil de STD le plus utilisé à La Réunion<sup>6</sup>, EnergyPlus a été retenu pour mener cette étude.

### 3.2.1 Plan d'expérience

#### Energie sensible

Pour l'énergie sensible, les paramètres testés (avec entre crochets leur libellé utilisé dans la partie résultat), leurs valeurs de référence, ainsi que leur plage de variation sont les suivants :

	Paramètre	Borne basse	Valeur de référence	Borne haute
<b>Déperditions des parois</b> <b>[Uparois]</b>	Coefficient de déperdition des murs verticaux extérieurs (W/m <sup>2</sup> /K)	0,7 <i>Ajout de 10 cm d'isolant à l'extérieur</i>	2,8	3,8 <i>Epaisseur du mur en béton divisée par 2</i>
	Coefficient de déperdition du toit (W/m <sup>2</sup> /K)	0,4 <i>Ajout de 10 cm d'isolant à l'extérieur (sous la tôle)</i>	0,7	2,8 <i>Dalle en béton seule</i>
	Coefficient de déperdition des parois vitrées (W/m <sup>2</sup> /K)	3,0	5,8	7,0

Remarque : les modifications retenues n'affectent pas seulement les déperditions des éléments, mais aussi leur inertie (transmission dynamique des apports solaires notamment).

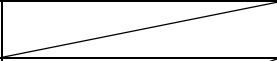

<b>Flux solaire transmis</b> <b>[trSol]</b>	Coefficient d'absorption solaire extérieur des murs extérieurs (-)	0,2	0,4	0,7
	Coefficient d'absorption solaire extérieur du toit (-)	0,4	0,7	1,0

<sup>5</sup> Notons qu'elles sont cohérentes avec le cas d'étude du livret PREBAT 4.

<sup>6</sup> Voir rendu 1.1.

	Facteur solaire des vitrages (-)	0,49	0,86	-
<b>Flux solaire absorbé par les planchers</b> [absPlancher]	Coefficient d'absorption solaire intérieur du sol (-)	0,4	0,7	1,0
<b>Flux solaire absorbé par les cloisons</b> [absCloison]	Coefficient d'absorption solaire intérieur des cloisons (-)	0,2	0,4	0,7
<b>Température de consigne</b> [Tcons]	Température de consigne (°C)	22	26	30
<b>Flux solaire réfléchi par l'environnement</b> [albEnvi]	Albédo de l'environnement (-)	0	0,2	0,7
<b>Masse inertielle</b> [Inert1]	Epaisseur de la dalle du plancher (cm)	10	20	30
<b>Propriétés inertielles<sup>7</sup></b> [Inert2]	Matériaux	Plancher de 20 cm de bois - conductivité thermique = 0,13 W/m/K - masse volumique = 500 kg/m <sup>3</sup> - capacité calorifique massique = 600 J/kg/K - effusivité = 323 W.s <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> /K - diffusivité = 1,6 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	Plancher de 20 cm de béton - conductivité thermique = 1,046 W/m/K - masse volumique = 2300 kg/m <sup>3</sup> - capacité calorifique massique = 657 J/kg/K - effusivité = 1257 W.s <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> /K - diffusivité = 6,9 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)	-

<sup>7</sup> Le ratio taille du vitrage sur surface absorbant le flux solaire transmis a un impact important sur la dynamique du besoin du froid. Cependant, ce paramètre a été jugé comme étant non-modifiable en étape conception et encore moins en rénovation étant lié à la morphologie globale du bâtiment.

<b>Protection solaire</b> <b>[Ombr]</b>	Ombrage (-)		0	1
	Masques		Aucun	Optimisés par orientation

Remarque : conformément aux recommandations du programme PERENNE, des débords infinis ont été retenus pour les parois Nord et Sud, et des lames horizontales pour les parois Est et Ouest. Les géométries retenues sont celles qui minimisent la largeur des débords pour les parois Nord et Sud (ratio débord sur hauteur vitrée respectivement égal à 0,6 et 0,2), et qui minimisent l'écart entre les lames pour les parois Est et Ouest (angle d'ouverture respectivement égal à 45° et 30°). La paroi vitrée horizontale a été considérée comme totalement masquée étant donné qu'elle est interdite par le programme.

Figure 3.2.1.a – Plan d'expérience pour l'analyse de sensibilité locale de l'énergie sensible.

Dans le plan d'expérience retenu, les planchers bas ne sont pas étudiés spécifiquement. D'une part parce que les puissances spécifiques mises en jeu sont relativement faibles comparées aux autres parois (écart de température faible) et même opposées (apport de froid) et d'autre part parce que les contacts avec le sol sont très variés (terre-plein, vide sanitaire, etc.) et que l'estimation de la température de celui-ci est très incertaine.

### Energie latente

Pour l'énergie latente, les paramètres testés (avec leur libellé entre crochets utilisé dans la partie résultat), leurs valeurs de référence, ainsi que leur plage de variation sont les suivants :

Phénomène	Paramètre	Borne basse	Valeur de référence	Borne haute
<b>Régime d'eau glacé</b> <b>[Tf]</b>	Température de soufflage (°C)	6	9	12
<b>Température de consigne</b> <b>[Tcons]</b>	Température de consigne (°C)	22	26	30
<b>Débit du ventilo-convecteur</b> <b>[Ps]</b>	Apports internes sensibles (W ; W/m <sup>2</sup> )	30 ; 2,4	60 ; 4,9	120 ; 9,8

A température de soufflage et débit d'eau glacée fixés, la modulation de la puissance délivrée par le système de climatisation se fait via le débit du ventilo-convecteur. Donc ici la modulation du besoin sensible vise uniquement à moduler le débit du ventilo-convecteur et donc le brassage de l'air intérieur.

<b>Renouvellement d'air</b> <b>[Ventil]</b>	Débit de ventilation (m <sup>3</sup> /h ; vol/h)	9 ; 0,3	18 ; 0,6	36 ; 1,2
<b>Apport latent</b> <b>[AL]</b>	Apports internes latents (W ; W/m <sup>2</sup> )	35 ; 2,9	70 ; 5,7	140 ; 11,4

Figure 3.2.1.b – Plan d'expérience pour l'analyse de sensibilité locale de l'énergie latente.

Le renouvellement d'air et les apports internes latents et sensibles des cas d'études seront estimés au cas par cas. Les valeurs présentées ici correspondent à un hypothétique bureau de 12,25 m<sup>2</sup> contenant une personne. Les apports internes correspondent à la puissance dégagée par le métabolisme de cette personne et le renouvellement d'air correspond au renouvellement d'air réglementaire. Les bornes supérieure et inférieure sont respectivement obtenues par multiplication et division par 2 de ces valeurs de référence, y compris dans les cas d'étude.

### 3.2.2 Méthodologie

Afin d'obtenir des résultats généralisables, non liés à des cas d'études particuliers, mais extrapolables à toutes configurations, une méthodologie spécifique a été développée.

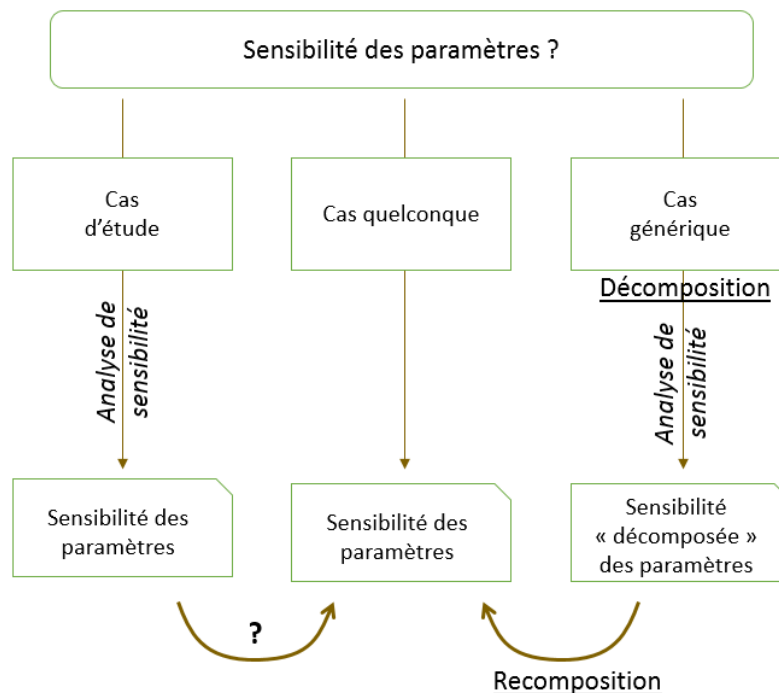


Figure 3.2.2.a – Schéma de principe de la démarche.

#### Cas générique

##### Energie sensible

Des résultats représentatifs et généralisables sont obtenus en décomposant les besoins frigorifiques du bâtiment par contributeurs<sup>8</sup> (on parlera alors de différentes charges thermiques). Pour le besoin sensible, ces contributeurs sont le renouvellement d'air, les apports internes et les flux de chaleur transmis à l'air intérieur par les surfaces vitrées et opaques.

La contribution du renouvellement d'air peut être défini de façon simple à partir des données météorologiques comme présenté précédemment dans l'analyse préliminaire du climat (2.3). Les apports internes, connus en tant que données d'entrée, représentent directement une charge de climatisation. En revanche, les charges transmises par les parois ne peuvent être déterminées simplement à cause des

<sup>8</sup> Voir annexe 1 pour la justification de cette approche.



dynamiques liées à l'inertie. Il est possible d'estimer les flux transmis de l'extérieur vers l'intérieur par ces parois, mais la dynamique de leur restitution à l'air intérieur dépend des matériaux intérieurs et leur agencement (réflexion des rayons solaires, déphasage et atténuation des variations de température, etc.).

Leur estimation repose donc sur l'utilisation de la STD via la modélisation d'une zone thermique parallélépipédique de base carrée de 3,5 m<sup>2</sup> de côté (12,25 m<sup>2</sup>) et de hauteur sous-plafond de 2,5 m, dont toutes les parois sont adiabatiques sauf une. Cette dernière sera orientée à tour de rôle vers le Nord, le Sud, l'Est, l'Ouest et l'horizontale. Cette paroi sera soit entièrement opaque, soit entièrement vitrée. Ces variantes permettront d'estimer la charge frigorifique causée par ces parois dans ces différentes configurations. Aucun renouvellement d'air et aucun apport interne ne sera modélisé pour ne considérer que la charge liée aux parois.

Cette méthode, dite de **décomposition**, permet donc de déterminer individuellement les charges dues à chaque contributeur. Il est alors possible de mener une analyse de sensibilité individuellement sur ceux-ci. Pour les charges liées aux parois, leur extrapolation à un cas quelconque pourra ensuite se faire au prorata des surfaces vitrées et opaques du cas en question, selon les orientations les plus proches. Etape que l'on appellera de **recomposition**.

Les dimensions et les compositions des parois entourant ces zones thermiques génériques sont les suivantes :

Parois	Surface (m <sup>2</sup> )	Composition <sup>9</sup>
Extérieure opaque (mur)	8,75	20 cm de béton
Extérieure opaque (toit)	8,75	Tôle en acier Lame d'air 20 cm de béton Lame d'air Dalles acoustiques
Extérieur vitrée	8,75	Simple vitrage
Plafond	12,25	20 cm de béton Lame d'air Dalles acoustiques
Plancher	12,25	Sol souple 20 cm de béton
Cloison	26,25	Plaque de plâtre Isolant Plaque de plâtre

Figure 3.2.2.b – Caractéristiques des parois du modèle.

La valeur des paramètres thermo-physiques correspondant sont ceux du cas de référence du plan d'expérience défini précédemment (3.2.1).

### Energie latente

L'énergie latente d'un système de climatisation provient de la condensation de l'eau contenue dans l'air au contact de l'émetteur de froid. Pour sa prise en compte de façon spécifique, nous avons utilisé le même

<sup>9</sup> Le détail des propriétés thermiques des matériaux est donné dans l'annexe 2.

type de zone que précédemment mis-à-part que toutes les parois sont adiabatiques de sorte à s'affranchir des contributions de celles-ci. Le paramétrage d'origine correspond aussi au cas de référence du plan d'expérience défini précédemment.

### *Cas d'études*

Des analyses de sensibilité ont été appliquées à des cas d'études réels afin de valider la démarche de généralisation : la sensibilité des paramètres extrapolée à partir des cas génériques pourra ainsi être comparé à la sensibilité des paramètres calculée en appliquant le plan d'expérience directement sur ces cas d'études.

Les cas d'études retenus sont issus de campagnes de mesures dans lesquels les frigorifiques délivrées par les systèmes de climatisation ont été mesurées au pas de temps horaire. Cette instrumentation nous permet de valider la modélisation non seulement par rapport aux bilans énergétiques annuels ou mensuels, mais aussi vis-à-vis des dynamiques temporelles au pas de temps horaire, qui sont essentielles pour le dimensionnement des systèmes de climatisation. Ceci représente notamment une avancée importante par rapport aux études menées précédemment par EnerTech à La Réunion (projet SWAC).

Les trois cas d'études sont :

- un bâtiment tertiaire accueillant du public, l'antenne ouest de la caisse d'allocation familiales (CAF) à Saint-Paul (1217 m<sup>2</sup> de surface climatisé répartie sur 2 niveaux) – instrumenté par GreenTech dans le cadre du projet SWACool ;
- une aile d'un bâtiment d'enseignement correspondant à la faculté de lettre de l'université de La Réunion à Saint-Denis (1756 m<sup>2</sup> de surface climatisé répartie sur 6 niveaux) – instrumenté par GreenTech dans le cadre du projet SWACool;
- et un bâtiment industriel de stockage (entrepôt pharmaceutique) à Saint-Gilles Les Bains (562 m<sup>2</sup> de surface climatisé répartie sur 1 niveau) – instrumenté par GreenTech dans le cadre de l'action 2 du projet Tropiclim.

Les caractéristiques des bâtiments étudiés ainsi que les hypothèses de modélisation réalisées sont données de façon détaillée dans l'annexe 4.

Pour la validation des modèles, il a été choisi de se restreindre uniquement à l'ajustement des apports internes, grandeur la plus incertaine, les autres paramètres paraissant suffisamment fiables, et les résultats de simulations reproduisant alors de façon suffisamment réaliste et physique les comportements réels des bâtiments. Une calibration plus poussée, notamment vis-à-vis des résultats horaires, nécessiterait une méthode bien plus lourde et complexe et n'apporterait pas des résultats forcément plus fiables étant donné les nombreuses incertitudes affectant particulièrement la dynamique horaire des besoins de froids (en particulier l'occupation, les charges internes, le renouvellement d'air et le comportement des systèmes).

Les apports internes ont donc été ajustés de sorte que les besoins frigorifiques annuels calculés par la simulation correspondent à la consommation de froid mesurée<sup>10</sup> à moins de 10 % près. Les comparaisons entre modèle et simulation, suivant les indicateurs définis dans la section 3.1.2, sont donnés en annexe 5.

---

<sup>10</sup> Les résultats de mesures et de simulation ont été filtrés de sorte à ce que les jours de fonctionnement soient cohérents et de sorte à ne pas prendre en compte les pics de relance dus aux systèmes (refroidissement du réseau d'eau) et non aux besoins du bâtiment.

## 4 Résultats des analyses de sensibilité

La méthodologie définie précédemment a été appliquée aux différents cas introduits précédemment. Les résultats sont présentés ici, en distinguant le cas générique des cas d'études.

### 4.1 Analyse de sensibilité du cas générique

Le cas générique a pour objectif de donner une vue d'ensemble de l'évolution des besoins de froid et de l'impact des variantes sur ceux-ci.

#### 4.1.1 Contributions de référence

Avant de tester l'influence des variantes, intéressons-nous dans un premier temps aux contributions des différentes parois aux besoins de froid.

##### *Pour le besoin sensible – parois*

Les figures suivantes présentent les contributions aux besoins de froid en énergie sensible des différentes parois selon leur orientation et leur type, en fonction des différents indicateurs retenus (les résultats sont ici ramenés par  $m^2$  de surface exposée à l'extérieur). Pour le besoin annuel lié aux parois vitrées, est indiquée en clair la part qui pourrait être supprimée grâce à l'ajout de protections solaires fixes (voir variante [Ombr] du plan d'expérience).

On observe tout d'abord que les parois vitrées contribuent logiquement bien plus que les parois opaques. La paroi vitrée horizontale est celle qui contribue le plus aux besoins de froid. Viennent ensuite les parois vitrées Est et Nord. Concernant les parois opaques, la contribution la plus importante n'est pas celle du toit car celui-ci est plus isolé. En conséquence les orientations Est et Nord sont les plus contraignantes.

Les contributions mensuelles des parois sont plus importantes lors de l'été austral, sauf pour l'orientation Nord ou la dynamique est inverse. L'importance de la contribution des parois Nord est donc à relativiser, car son importance est moindre pendant la période dimensionnante.

Concernant les contributions instantanées, les toits vitrés apportent toujours la contribution la plus importante. Viennent ensuite à part sensiblement égale les orientations Nord, Est et Ouest. Notons que les pics sont extrêmement ponctuels car en filtrant 5% des plus grandes valeurs, la puissance maximale diminue de 30 à 50 %.

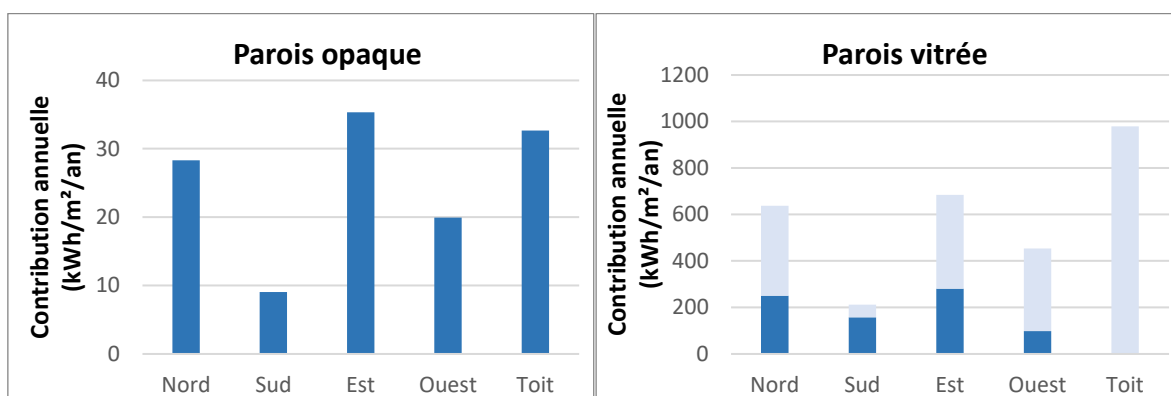


Figure 4.1.1.a – Contributions annuelles aux besoins frigorifiques des parois opaques et vitrées.

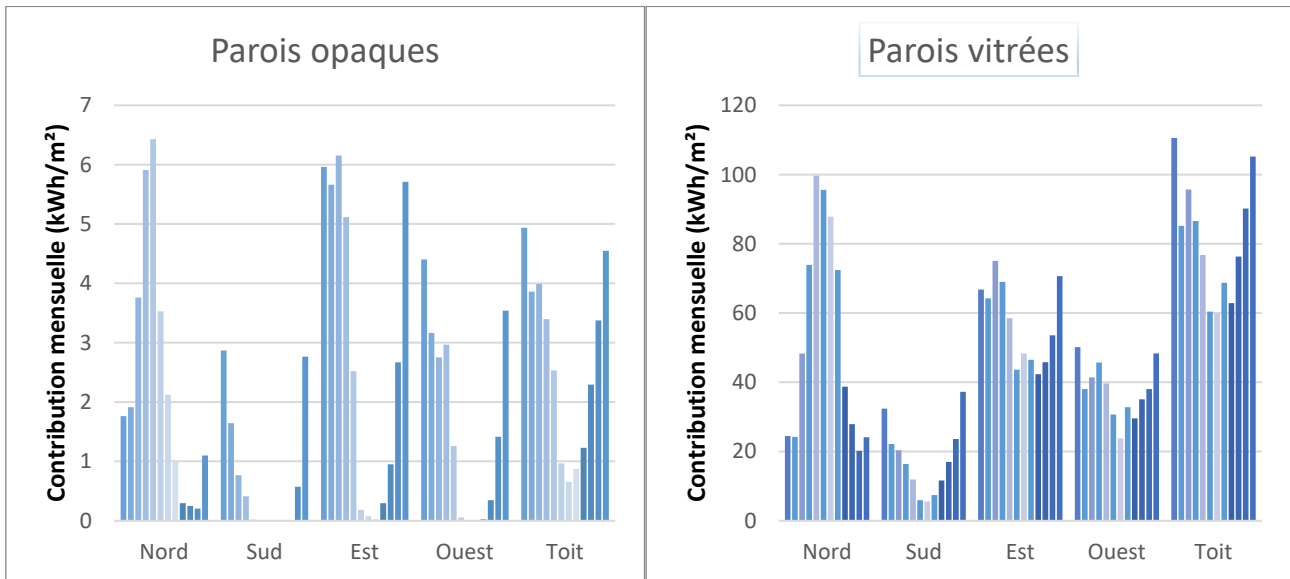


Figure 4.1.1.b – Contributions mensuelles aux besoins frigorifiques des parois opaques et vitrées.

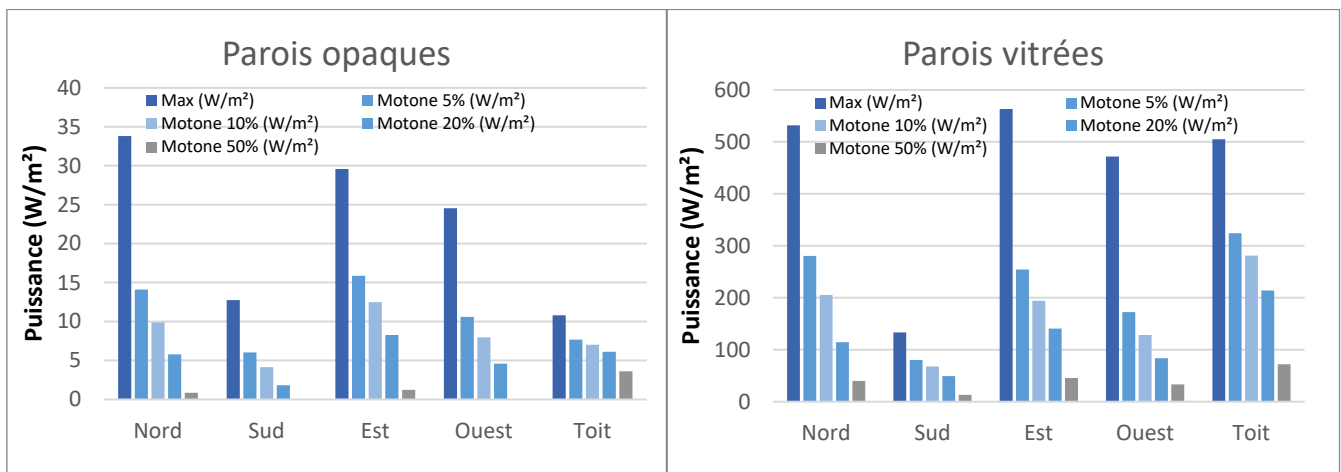


Figure 4.1.1.c – Monotone des contributions aux besoins frigorifiques des parois opaques et vitrées.

Il est important de noter que la contribution des parois Est (opaques et vitrées) est plus importante que celle des parois Ouest, alors qu'on s'attendrait à l'inverse étant donné que cette dernière cumule en fin de journée un flux solaire incident quasiment perpendiculaire et une température extérieure plus élevée. Mais comme vu précédemment (partie 2), cela s'explique par une couverture nuageuse plus importante en fin de journée, qui limite de fait la contribution des parois Ouest. Notons à ce sujet que le programme PERENE ne semble pas prendre en compte cette spécificité étant plus contraignant pour les orientations Ouest en termes de facteur solaire. Toutefois, cette spécificité n'est peut-être pas généralisable à l'ensemble de La Réunion.

#### Pour le besoin sensible – renouvellement d'air

Par soucis de concision, les représentations graphiques de ces évolutions sont à retrouver en 4.1.2.

Un renouvellement d'air apporte 1,4 kWh/an de besoin de froid sensible par m<sup>3</sup>/h d'air ventilé. Notons que le renouvellement d'air apporte plus de froid que de chaud au global et ce 10 mois sur 12. D'ailleurs, le renouvellement d'air apporte de la chaleur uniquement en journée et est systématiquement suivi d'un apport de froid la nuit. La répartition mensuelle met en évidence la saisonnalité de ce besoin. Les besoins instantanés de froid les plus importants engendrés par le renouvellement d'air (entre 1 et 2,3 W par m<sup>3</sup>/h d'air ventilé) sont très ponctuels (moins de 5 % du temps).

### Pour le besoin latent

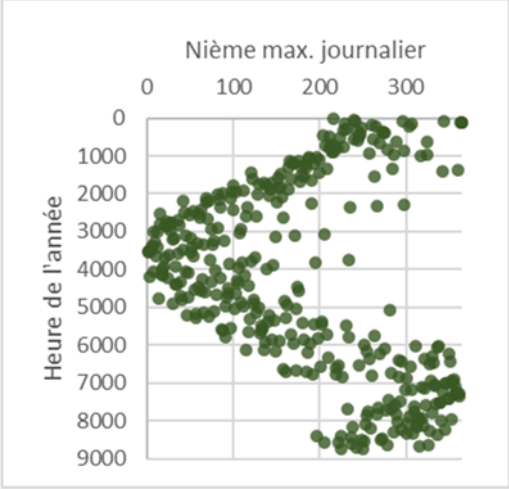
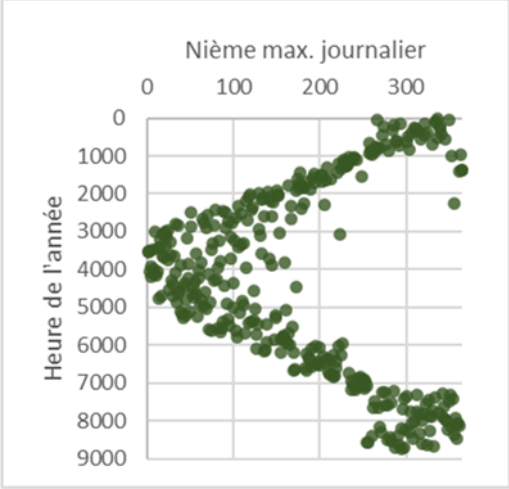
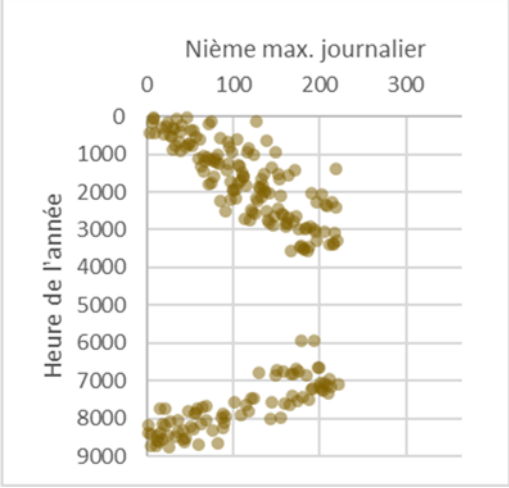
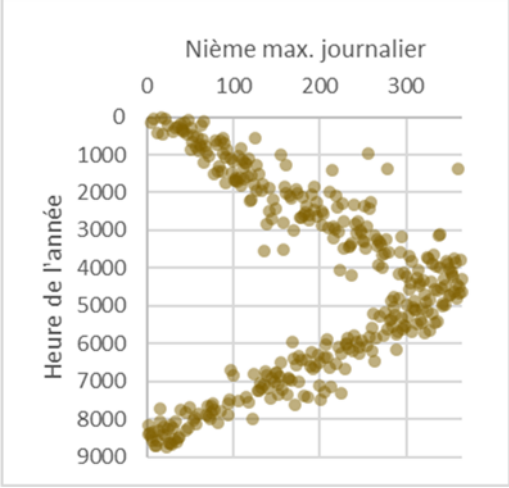
Etant donné la dépendance du latent au fonctionnement du système de climatisation, et donc au besoin sensible, il n'est pas possible, et cela n'aurait pas de sens, d'étudier le latent de façon indépendante. En revanche, il est possible d'étudier à part la contribution du climat extérieur sur la puissance latente, à savoir l'impact de la teneur en eau. Celle-ci est étudiée en détail dans ce qui suit concernant sa temporalité. L'influence des paramètres sur la puissance latente est étudiée spécifiquement en 4.1.2.

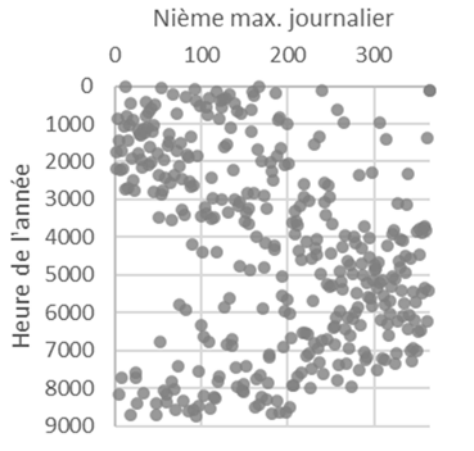
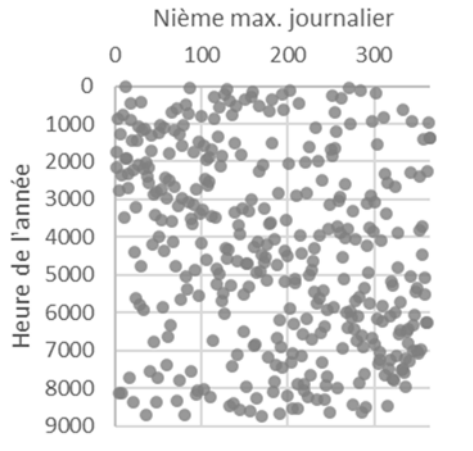
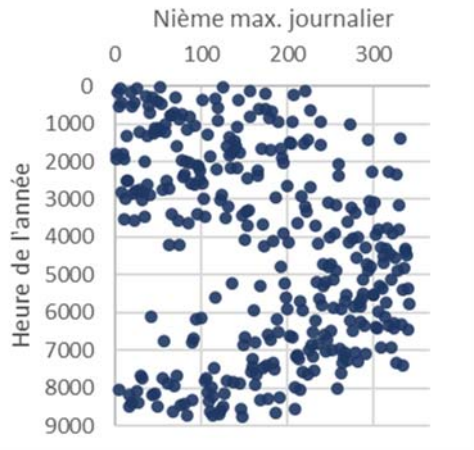
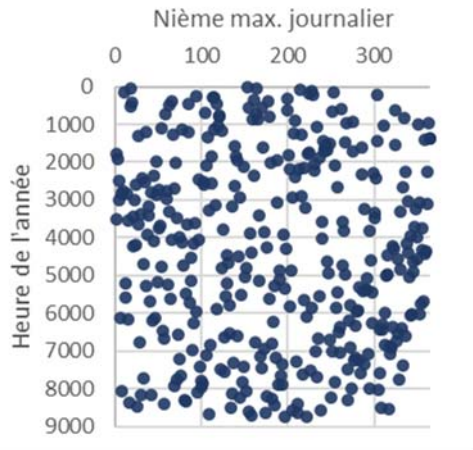
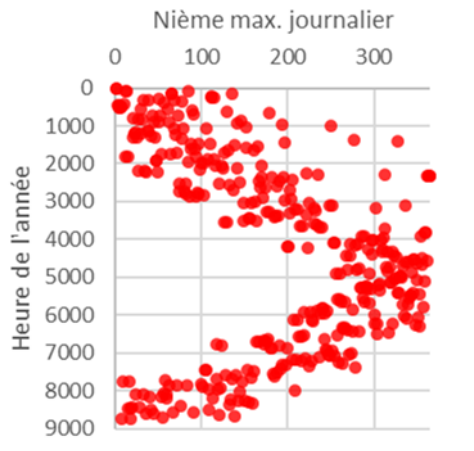
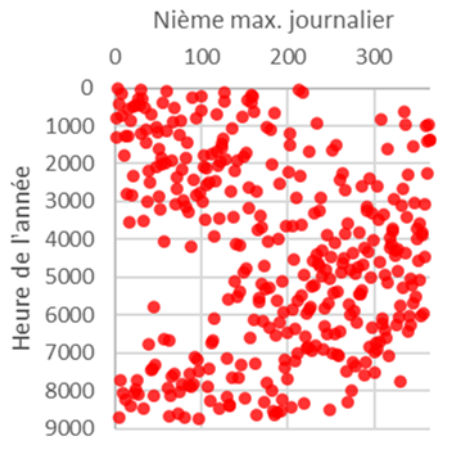
### Foisonnement

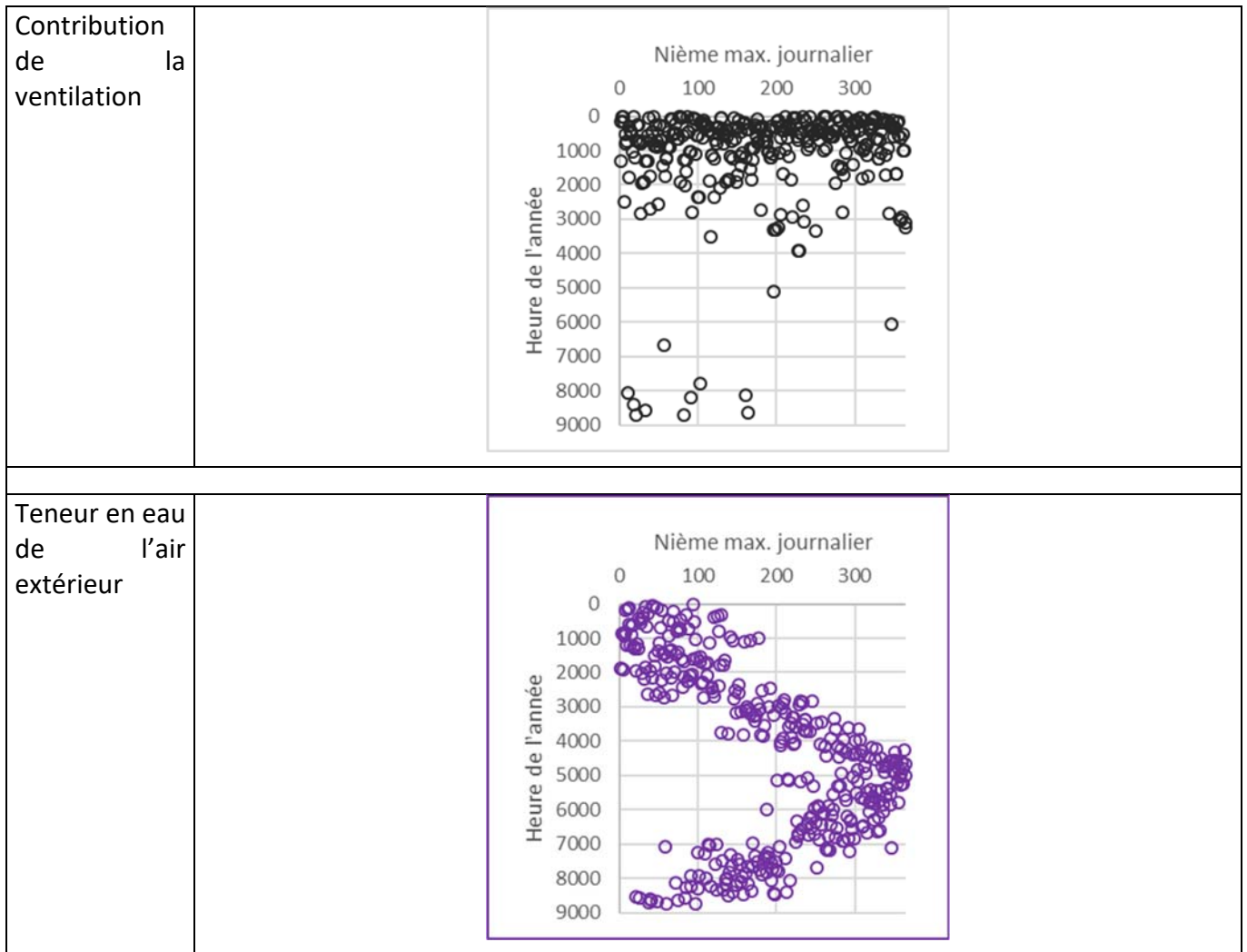
Le fait d'étudier les impacts sensible et latent séparément et selon l'orientation et le type de parois ne nous permet pas de conclure quant à l'impact global en termes de monotone du fait que les maxima n'apparaissent pas forcément aux mêmes instants. La « recomposition » fait appel à la notion de foisonnement.

Il n'y a pas de règles générales évidentes pour estimer le foisonnement de la puissance entre deux zones tant il dépend des configurations. La meilleure manière d'estimer la monotone globale d'un bâtiment reste de calculer les évolutions temporelles des besoins de chacune de ses zones et de les sommer.

Il est toutefois possible d'étudier quand ont lieu les niveaux de puissances dans les cas de références. Ces résultats sont évidemment indicatifs étant donné que les variantes peuvent-être amenées à modifier ces occurrences.

Contributions des	Parois opaques	Parois vitrées
Nord		
Sud		

Contributions des	Parois opaques	Parois vitrées
Est		
Ouest		
Horiz.		
<p>Remarque : l'absence de valeurs est due au fait que la contribution de la paroi est nulle (pas de charge thermique).</p>		



Notes : l'heure zéro correspond au créneau [0 ; 1h[ du 1<sup>er</sup> janvier. Les maximums sont classés par ordre décroissant selon les ordonnées : le pic annuel est donc tout à gauche. Une courbe de cette forme « < » indique que la charge est maximale en milieu d'année, et inversement pour les courbes de cette forme « > ».

Figure 4.1.1.d – Heure d'occurrences au cours de l'année des maximums journaliers des différents charges.

On observe qu'en général les puissances les plus importantes ont lieu logiquement en période d'été austral (début et fin d'année) et ce quelles que soient les contributions, mis à part pour l'orientation Nord qui elle contribue de façon plus importante en hiver austral, comme vu précédemment.

La saisonnalité est moins marquée pour les orientations Est et Ouest, probablement parce que la course du soleil à La Réunion reste quasiment perpendiculaire à ces orientations respectivement le matin et le soir quelle que soit la saison. La saisonnalité est toutefois plus marquée pour les parois opaques du fait de la variation de la température extérieure. Rappelons que les apports de chaleur de la ventilation n'ont lieu qu'en fin de période estivale (début d'année) et que le reste du temps la température extérieure est inférieure à 26°C. La teneur en eau de l'air extérieur suit la tendance générale des contributions des parois, ce qui est logique puisque la saison la plus chaude est aussi la saison la plus humide. On s'attend donc à ce que la puissance latente soit plus importante sur cette période.

Sachant les contributions relativement synchrones sur une année, intéressons-nous maintenant à leurs heures d'occurrences au cours des journées.

Contribution des	Parois opaques	Parois vitrées
Nord		
Sud		
Est		



Contribution des	Parois opaques	Parois vitrées
Ouest		
Horiz.		

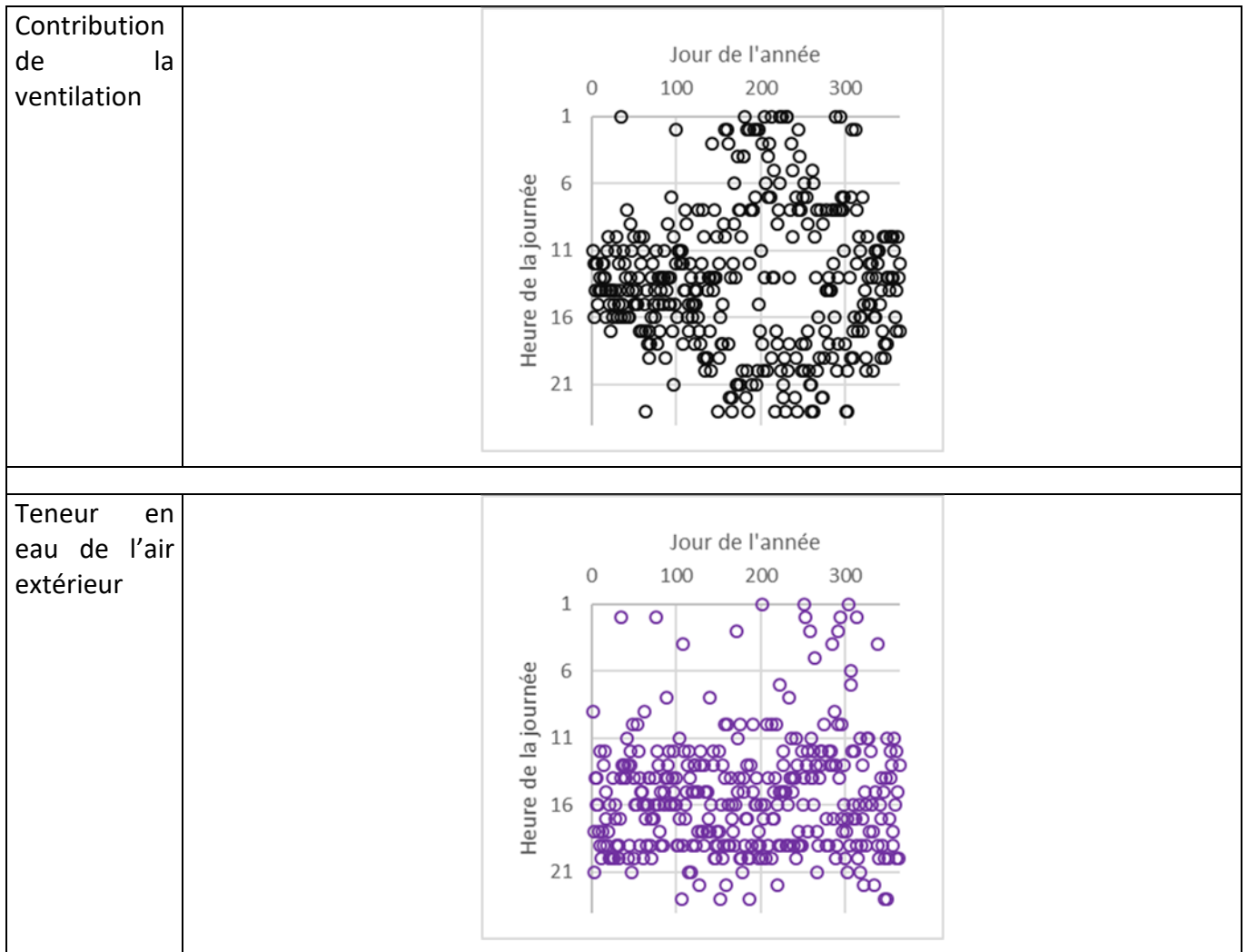


Figure 4.1.1.e. – Heure d'occurrence des maximaux journaliers par jours de l'année pour les différents contributeurs.

On observe que les heures d'occurrence des maximaux sont relativement identiques tout au long de l'année mais fortement dépendants des orientations, ce qui entraîne donc un foisonnement au global. En moyenne, les pics arrivent autour de 13-14 h. Par ailleurs, les pics quotidiens de la teneur en eau de l'air extérieur ont lieu en fin de journée, autour de 16 h.

De plus, on peut remarquer que les pics des parois opaques arrivent environ 4 h après ceux des parois vitrées pour les parois verticales et 9 h après pour la paroi horizontale. Ce décalage met en évidence le déphasage occasionné par l'inertie thermique de transmission des parois.

#### 4.1.2 Impact des variantes

Connaissant la contribution des différentes parois et de la ventilation aux besoins frigorifiques, intéressons-nous à l'influence des variantes sur celles-ci.

##### Sur le besoin sensible

##### Par le renouvellement d'air

Physiquement, la puissance thermique apportée par le renouvellement d'air  $P_v$  s'exprime ainsi :

$$P_v = Q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{ext} - T_{in})$$

Avec  $Q_v$  le débit de renouvellement d'air,  $\rho$  la masse volumique de l'air,  $c_p$  la capacité calorifique massique,  $T_{ext}$  la température extérieure et  $T_{in}$  la température d'air intérieur.

On observe donc que la charge est directement proportionnelle au débit de renouvellement d'air (autrement dit, une variation de  $x\%$  du débit entrainera une variation de  $x\%$  de la charge thermique engendrée).

En revanche, la dépendance à la température de consigne (donc intérieure) est plus complexe dans le sens où la puissance dépend de l'écart avec la température extérieure. L'impact a été quantifié pour une variation de  $\pm 4\text{ °C}$  (équivalent du gain possible à confort constant avec un brasseur d'air) autour de  $26\text{ °C}$ . Le tableau suivant indique l'impact de cette modification sur les besoins sensibles annuels :

Température de consigne (°C)	22 °C	26 °C	30 °C
Energie frigorifique annuelle (kWh/(m³/h))	7,39 (+ 426 %)	1,40	0,04 (- 97 %)
Période de besoin (h)	6413 (+ 180 %)	2261	174 (- 92 %)

Figure 4.1.2.a – Impact de la température de consigne sur la charge thermique sensible annuelle liée au renouvellement d'air et sur sa période d'occurrence.

Les figures suivantes montrent l'influence de la température de consigne à l'échelle mensuelle et suivant la monotone. Pour chaque catégorie les valeurs sont données pour une consigne de  $22\text{ °C}$ ,  $26\text{ °C}$  puis  $30\text{ °C}$ . La valeur en rouge correspond aux charges thermiques (le renouvellement d'air apporte de la chaleur), tandis que la couleur bleue correspond à un apport de fraîcheur.

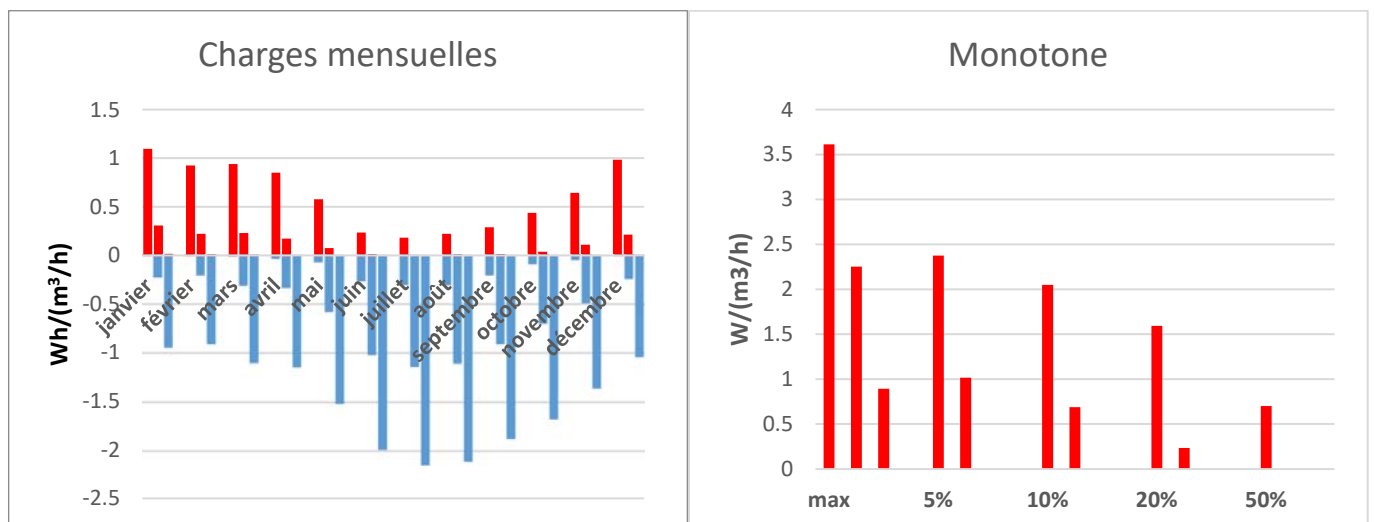


Figure 4.1.2.b – Impact de la température de consigne sur les charges thermiques sensibles mensuelles liées au renouvellement d'air et sur leur monotone.

On observe que le choix de la température de consigne à un impact majeur sur la charge frigorifique engendrée. La diminution de la température de consigne de 4 °C entraîne une augmentation de la période de besoin d'un facteur 3. Les périodes où le renouvellement d'air apporte de la fraîcheur ont quasiment disparues en période estivale, et un besoin apparaît en période hivernale. La répercussion sur le besoin engendré est majeure en bilan annuel et mensuel (jusqu'à fois 5), mais par contre moindre sur le besoin maximal (+ 60 %). De façon opposé, l'augmentation de 4 °C de la température de consigne réduit quasiment intégralement la charge thermique du renouvellement d'air. Le renouvellement d'air a alors un effet bénéfique sur la climatisation en apportant de la fraîcheur une majeure partie du temps (plus de 95 %).

### Par les parois

Les résultats présentés ci-dessous sont principalement donnés à titre qualitatif plutôt que quantitatif, étant donné qu'ils dépendent du cas de référence et des bornes de variation retenues. Toutefois, ceux-ci ont été définis de sorte à être représentatifs du parc réunionnais et des alternatives de conception possibles. Leur généralisation à des cas d'études sera testée dans la suite. Comme précédemment, les résultats sont ici donnés par m<sup>2</sup> de surface exposée vers l'extérieur.

Les résultats sont fournis sous forme graphique, par orientation, pour les différentes variantes considérées (la correspondance des libellés des étiquettes de données, rappelée entre crochet dans la suite, est indiquée dans le tableau du plan d'expérience). Les valeurs en bleu correspondent aux valeurs basses des paramètres du plan d'expérience et les valeurs en rouge aux valeurs hautes. Une valeur négative indique une diminution du besoin frigorifique, et inversement.

Pour les parois opaques, on observe que la température de consigne [Tcons] a un impact prépondérant, et ce quelle que soit leur orientation. En second lieu, pour les parois aux contributions les plus importantes (Nord et Est, puis Ouest dans une moindre mesure), l'ombrage [Ombr], le coefficient d'absorption solaire [trSol], le coefficient de déperdition [Uparois] et l'albédo de l'environnement [albEnvi] sont aussi fortement impactant. Pour la toiture, comparée aux autres façades aux contributions plus importantes, l'impact plus faible de la température de consigne et du coefficient d'absorption solaire s'explique par la présence d'isolant dans sa composition. Le rôle prépondérant de l'isolant est d'ailleurs mis en évidence par l'importance de l'impact de l'augmentation du coefficient de déperdition [Uparois]. Notons pour finir que les coefficients d'absorption solaire intérieurs [absPlancher et absCloisons], l'inertie intérieure que ce soit en capacité mobilisable [Inert1] ou en type de matériaux [Inert2] ont un rôle tout à fait mineur.

De la même façon que pour les contributions, les impacts sur les parois vitrées sont largement plus importants que ceux sur les parois opaques. Les paramètres agissant sur le flux solaire incident et transmis sont logiquement les plus importants, par ordre d'importance : la présence de casquette<sup>11</sup> [Ombr], l'albédo de l'environnement<sup>12</sup> [albEnvi] et le coefficient de transmission [trSol]. L'impact de la température de consigne [Tcons] est aussi prépondérant. Dans une moindre mesure, vient ensuite le coefficient de déperdition [Uparois]. L'impact de ce dernier est d'ailleurs inversé par rapport aux parois opaques, c'est-à-dire qu'une diminution des déperditions entraîne une augmentation des besoins de froid. Ce comportement est directement lié à l'effet de serre du vitrage avec une diminution du potentiel de refroidissement en période nocturne à cause de la surisolation de celui-ci. Toutefois, dans une configuration réelle de bâtiment, cet excédent de chaleur pourrait être évacué via le renouvellement d'air.

---

<sup>11</sup> Pour une meilleure visibilité l'impact de l'ombrage de la fenêtre horizontale est coupé. Etant complètement masquée, l'impact vaut la contribution.

<sup>12</sup> Mis-à-part pour la fenêtre horizontale qui ne reçoit évidemment pas de réflexion du sol.

Ce résultat est donc probablement non représentatif. L'impact des autres variables [absPlancher], [absCloison], [Inert1] et [inert2] est du même ordre de grandeur et plus impactant pour le toit. Ces impacts s'expliquent aussi par l'effet de serre plus ou moins évacuable en période nocturne et potentiellement aggravé dans ces variantes (augmentation du flux solaire absorbé par les parois à l'intérieur). Toutefois, l'augmentation et la diminution de l'inertie [inert1] diminue dans les deux cas les besoins frigorifiques. En effet l'augmentation de l'inertie limite l'échauffement journalier et donc global, tandis que sa diminution permet un refroidissement nocturne plus rapide qui compense l'augmentation des pics journaliers (phénomène plus détaillé dans la suite).

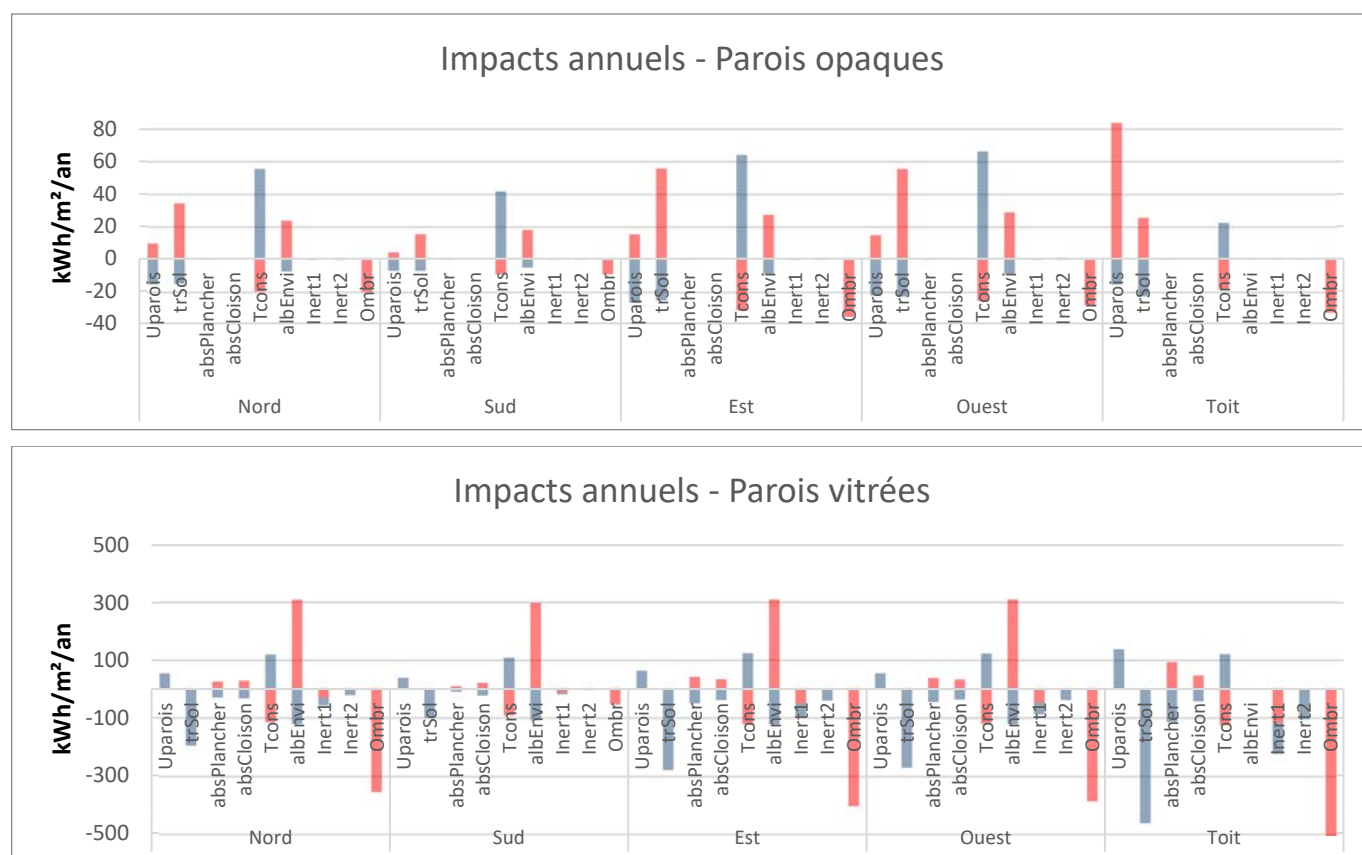


Figure 4.1.2.b – Impacts annuels des différents paramètres sur les charges thermiques des parois.

Les figures suivantes présentent les impacts des variantes sur la monotone. Les nuances de couleurs, du plus foncé au plus clair, indiquent la valeur sur la monotone des niveaux de puissance dépassés respectivement 50, 20, 10, 5 et 0 % (maximum) du temps.

Pour les parois opaques, les paramètres impactant le besoin annuel et la puissance sont les mêmes. En revanche, les niveaux de puissances ne sont pas affectés de la même façon : les paramètres modifiant la transmission la contribution du flux solaire, à savoir l'albedo de l'environnement [albEnvi], le coefficient de déperdition [Uparois], le coefficient d'absorption solaire [trSol] et l'ombrage des parois [Ombr] ont un impact bien plus important sur les pics de puissance. Tandis que [Tcons] impacte de façon quasi identique tous les niveaux de puissance (traduit une translation de ceux-ci sur la monotone).

Ces observations sont globalement aussi valables pour les parois vitrées, mis à part pour le coefficient de déperdition [Uparois] qui, dans ce cas, n'affecte pas le flux solaire. Par contre, il est notable de remarquer que les puissances les plus grandes s'avèrent particulièrement impactées par les variantes portant sur l'inertie [Inert1 et Inert2]. Ce phénomène est dû au fait qu'une inertie plus faible des parois internes entraîne un échauffement plus rapide de l'air de la zone.

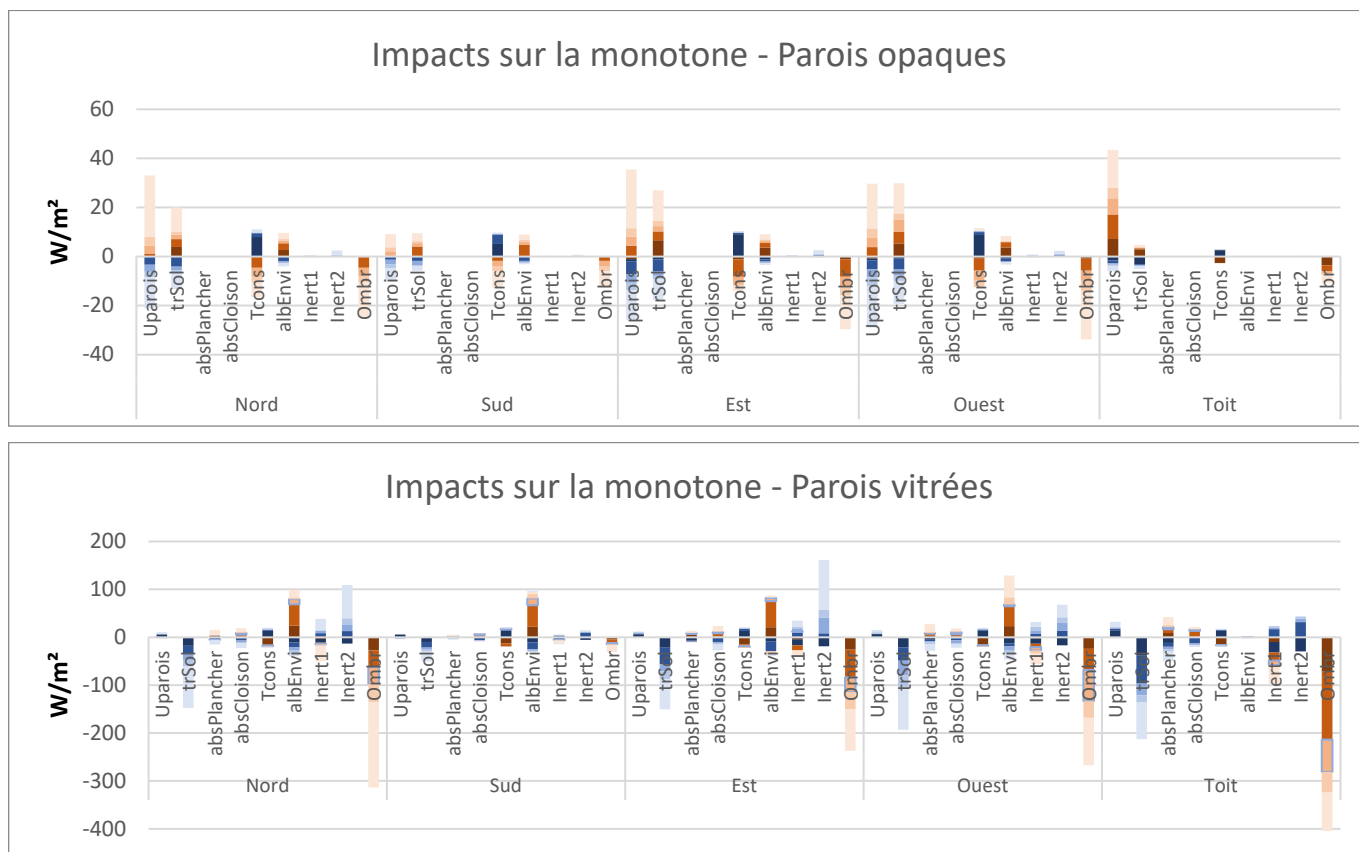


Figure 4.1.2.c – Impacts des différents paramètres sur la monotone des charges thermiques des parois.

Enfin, les derniers graphiques donnent les impacts des variantes sur l'étendue de la période de besoin frigorifique. Contrairement aux indicateurs précédents, la période de climatisation est plus impactée par les variantes sur les parois opaques, probablement dû aux effets inertiels associés à ces parois. Les variantes les plus impactantes sont celles portant sur l'ombrage [Ombr] (diminution de la période d'ensoleillement), la température de consigne [Tcons] (modification des degrés-heures de refroidissement), le coefficient d'absorption solaire [trSol] (modification de l'énergie solaire stockée) et l'albédo de l'environnement [albEnvi] (modification de l'énergie solaire reçue).

Pour les parois vitrées, comme précédemment, la température de consigne [Tcons], l'ombrage [Ombr] et le coefficient d'absorption solaire [trSol] sont les paramètres les plus impactant. Notons que l'inertie [Inert et Inert2] a ici un impact du même ordre de grandeur. Ceci s'explique par le fait qu'une inertie plus faible réduit l'étalement dans le temps de la diffusion du flux solaire absorbé en journée. L'impact énergétique est lui quasiment nul car la quantité d'énergie mise en jeu est la même, seule sa répartition dans le temps est modifiée. On observe enfin que la diminution du coefficient de déperdition des parois [Uparois] entraîne une augmentation de la période de climatisation. En effet, bien que sa diminution réduise les besoins, l'isolation supplémentaire réduit le potentiel de réduction nocturne et donc augmente globalement la période de besoin. Là aussi, dans un cas réel, ce problème de surchauffe nocturne pourrait être limité par renouvellement d'air.

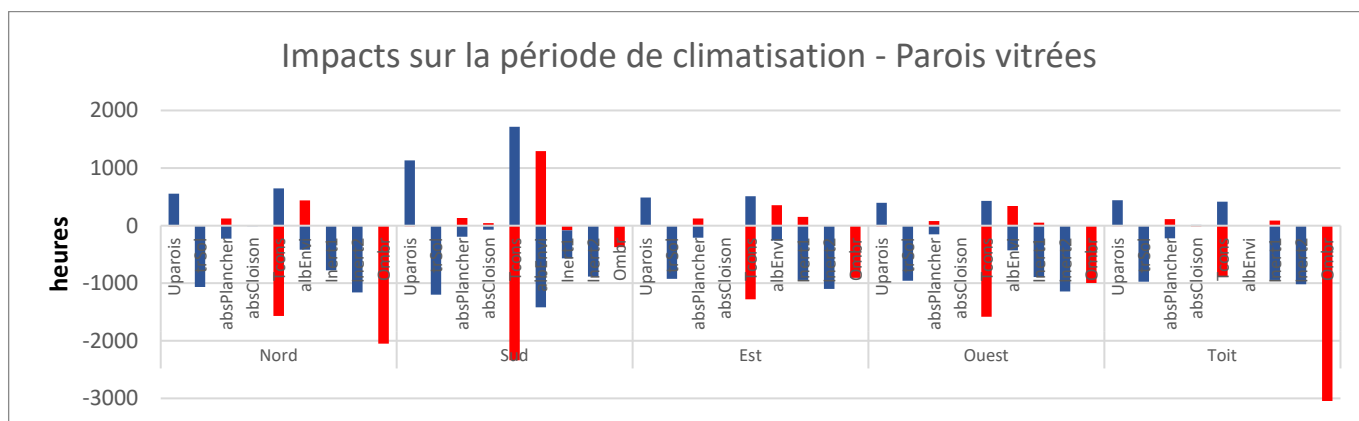
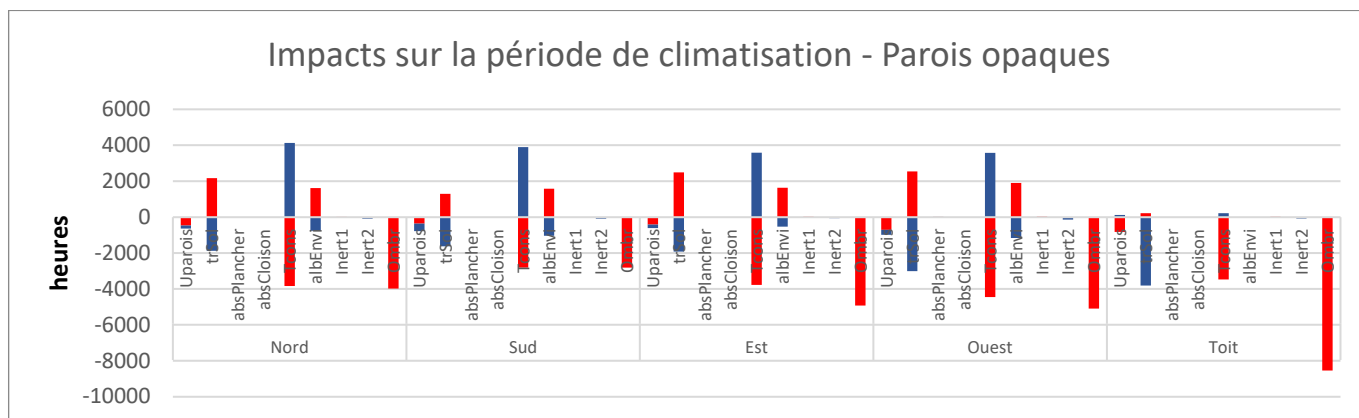


Figure 4.1.2.d – Impacts des différents paramètres sur l'étendue temporelle des charges thermiques des parois.

Concernant l'influence des orientations sur les impacts, on observe que les tendances et la hiérarchie des impacts sont globalement les mêmes. Mis à part à cause de la différence de composition entre toit et murs, la variabilité des impacts tient à la différence d'exposition au soleil : plus ou moins exposé, plus ou moins incident et plus ou moins tôt dans la journée.

### Sur le besoin latent

#### Influence des principaux paramètres

Dans le but de déterminer une relation permettant d'estimer la puissance frigorifique latente avec un nombre réduit de paramètres, les figures suivantes donnent l'évolution temporelle de cette puissance en fonction de l'hygrométrie absolue intérieure et des différents jeux de paramètres testés. Pour chacune d'entre elles, le nom du paramètre est donné au-dessus du graphique, les niveaux testés sont indiqués en légende. Le code couleur est, par ordre croissant de la valeur des paramètres : vert, bleu, gris, orange. Le niveau gris correspond au cas de référence indiqué précédemment dans le cas de référence.

Comme on peut l'observer, l'évolution temporelle est largement liée à l'hygrométrie intérieure : plus celle-ci est importante et plus il y a de condensation. L'évolution de l'hygrométrie étant elle-même dépendante des autres conditions.

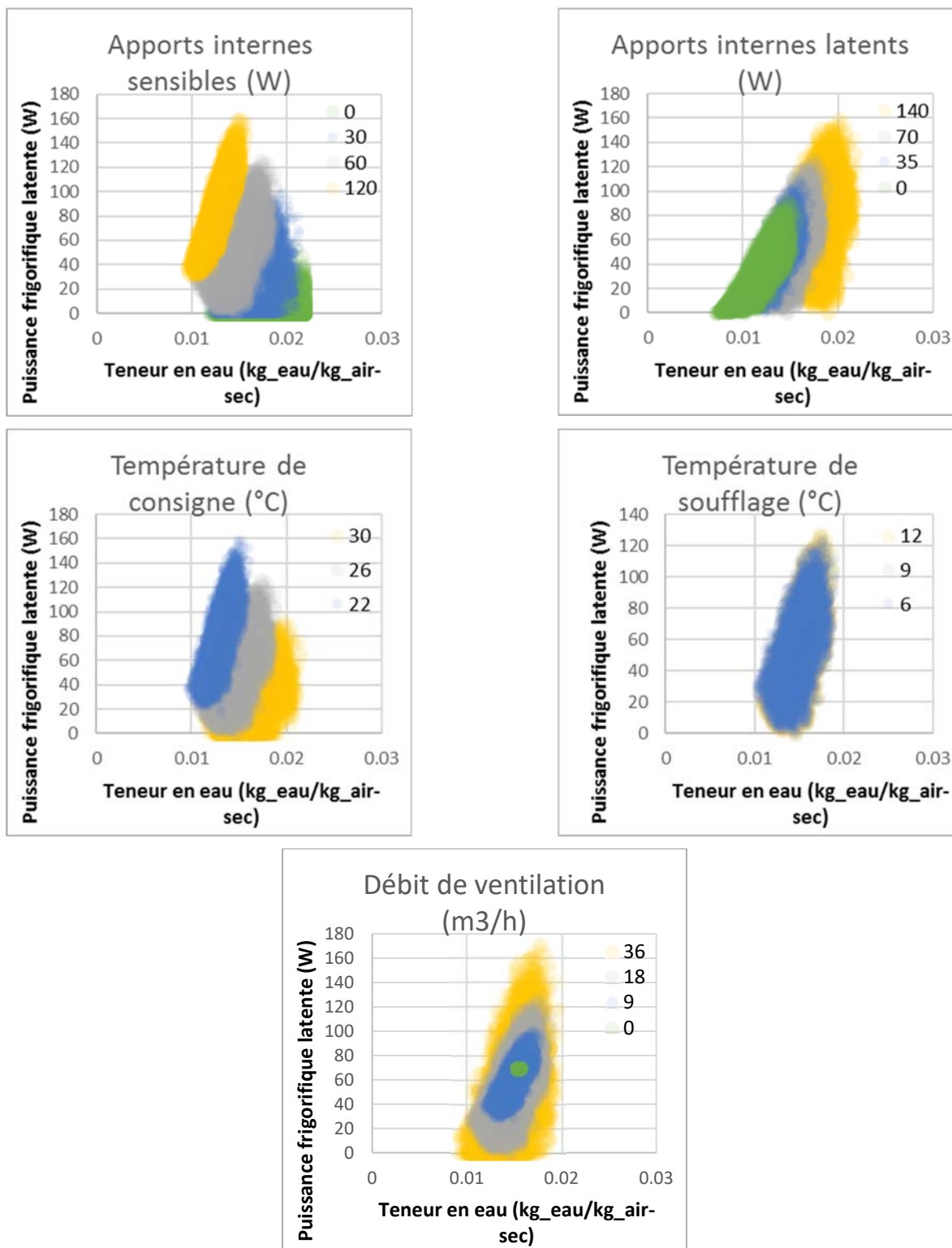


Figure 4.1.2.e – Influence des principaux paramètres sur le besoin frigorifique latent.

L'augmentation du débit de la cassette du ventilo-convecteur (pour fournir une puissance sensible plus importante), amène plus d'air au contact de la batterie froide, et augmente donc la condensation. Ceci réduit la plage de variation de l'hygrométrie intérieure et augmente la puissance frigorifique latente.

L'ajout d'apport latent augmente logiquement l'hygrométrie intérieure et augmente mécaniquement la puissance latente.



La température de soufflage a un effet tout à fait mineur sur la puissance latente et l'hygrométrie. En effet à ces niveaux de température la teneur saturante en eau varie relativement peu ( $3 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$ ), la déshumidification en est donc relativement peu impactée.

L'impact observé de la température de consigne est plus dû à la variation du brassage nécessaire pour compenser les charges liées au renouvellement d'air plus ou moins importantes à cause de la modification de la température de consigne qu'à l'impact même de la température de consigne.

Le renouvellement d'air augmente l'hygrométrie intérieure par apport d'humidité extérieure et mécaniquement la puissance latente. Cependant, les charges thermiques augmentent aussi, ce qui augmente le brassage et donc la condensation et tend à réduire l'hygrométrie. La variation de l'hygrométrie semble en conséquence rester relativement stable, en revanche, la plage de variation de la puissance frigorifique latente est elle bien augmentée.

Afin de déterminer individuellement le rôle de ces différents paramètres, il est possible d'établir l'équation suivante, à l'aide d'un bilan latent de la zone :

$$Q_v \cdot \rho \cdot (r_{\text{ext}} - r_{\text{int}}) \cdot L_v + A_{\text{lat}} = P_{\text{lat}}$$

Avec  $Q_v$  le débit volumique de renouvellement d'air [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] la masse volumique de l'air,  $r_{\text{ext}}$  et  $r_{\text{int}}$  les teneurs en eau respective de l'air extérieur et intérieur [ $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air-sec}}$ ],  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau [ $\text{J}/\text{kg}$ ],  $A_{\text{lat}}$  les apports internes latents [ $\text{W}$ ] et  $P_{\text{lat}}$  la puissance frigorifique latente [ $\text{W}$ ].

Cette formule peut être utilisée directement si l'humidité intérieure est régulée. Ce qui, d'après le retour obtenu de la part des acteurs réunionnais en sous-tâche 1.1, est exceptionnel (demande explicite pour des besoins particulier). La déshumidification étant non-contrôlée, elle résulte indirectement du fonctionnement de la climatisation.

Les résultats précédents ont mis en évidence que l'hygrométrie résultant de cet équilibre dépend principalement du taux de brassage et des apports latents. Il est possible de faire apparaître ces paramètres, en isolant le volume d'air traversant le ventilo-convecteur :

$$Q_v^b \cdot \rho \cdot (r_{\text{int}} - r_s) \cdot L_v = P_{\text{lat}}$$

Avec  $Q_v^b$  le débit de brassage du ventilo-convecteur,  $r_s$  la teneur en eau en sortie du ventilo-convecteur (pouvant être approximée par la teneur saturante à la température de soufflage).

En combinant les deux expressions on obtient :

$$P_{\text{lat}} = \frac{Q_v^b}{Q_v^b + Q_v} \cdot (Q_v \cdot \rho \cdot (r_{\text{ext}} - r_s) \cdot L_v + A_{\text{lat}})$$

Ainsi, pour estimer la puissance latente, il est nécessaire de connaître les débits de brassage, de renouvellement d'air et la température de soufflage.

Selon le type de régulation (variation du débit du ventilo-convecteur ou de la température de soufflage), on peut être en mesure de déterminer  $Q_v^b$  ou  $r_s$  via la température de soufflage  $T_s$  avec la relation suivante :

$$P_{\text{sens}} = Q_v^b \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{int}} - T_s)$$

Avec  $P_{\text{sens}}$  les besoins frigorifiques sensibles (W) déterminable en amont,  $c_p$  la capacité calorifique massique de l'air ( $\text{J}/\text{K}/\text{kg}$ ),  $T_{\text{int}}$  la température intérieure de consigne

Par ailleurs, dans le cadre du dimensionnement des installations, il intéressant d'étudier si les maximums de puissance frigorifique latente coïncident avec les maximums de puissance frigorifique sensible. Etant donné la relation définie précédemment qui lie puissances latente et sensible, l'augmentation de la

puissance sensible via l'augmentation du débit de brassage ou de la diminution de la température de consigne augmentera simultanément la part latente.

Toutefois, la teneur en eau de l'air extérieur intervient aussi et peut affecter ces tendances. On a observé, dans l'étude du foisonnement que, sur l'année, celle-ci était maximale sur les mêmes périodes que les autres contributions (la saison chaude coïncide avec la saison humide), mais que les maximums journaliers apparaissent principalement autour de 16h. Ainsi ce paramètre ne devrait pas s'opposer notablement à la simultanéité des puissances frigorifiques sensible et latente, ce qui pourra être vérifié sur les cas d'étude.

### Impacts des variantes

Dans la dernière formulation de la puissance latente, on retrouve deux sous-contributeurs modulés par le taux de brassage, à savoir les apports latents et la déshumidification de l'air brassé. Sous les mêmes hypothèses que dans l'analyse préliminaire de climat pour les apports latents (bureau d'une personne), on voit qu'en saison de climatisation, conformément à l'expérience des sondés de la sous-tâche 1.1, la déshumidification de l'air contribue plus au besoin frigorifique latent que l'apport latent (50 kWh/mois/pers.), notamment en pic où elle peut atteindre 204 W/pers. (contre 70 W d'apports latent interne pour rappel). Les chiffres précédents étant estimés sans modulation par le ratio  $\frac{Q_v^b}{Q_v^b + Q_v}$ . Annuellement l'énergie frigorifique latente vaut 785 kWh/pers. (soit 44 kW/(m<sup>3</sup>/h)). La répartition mensuelle et la monotone sont données dans les graphiques suivants.

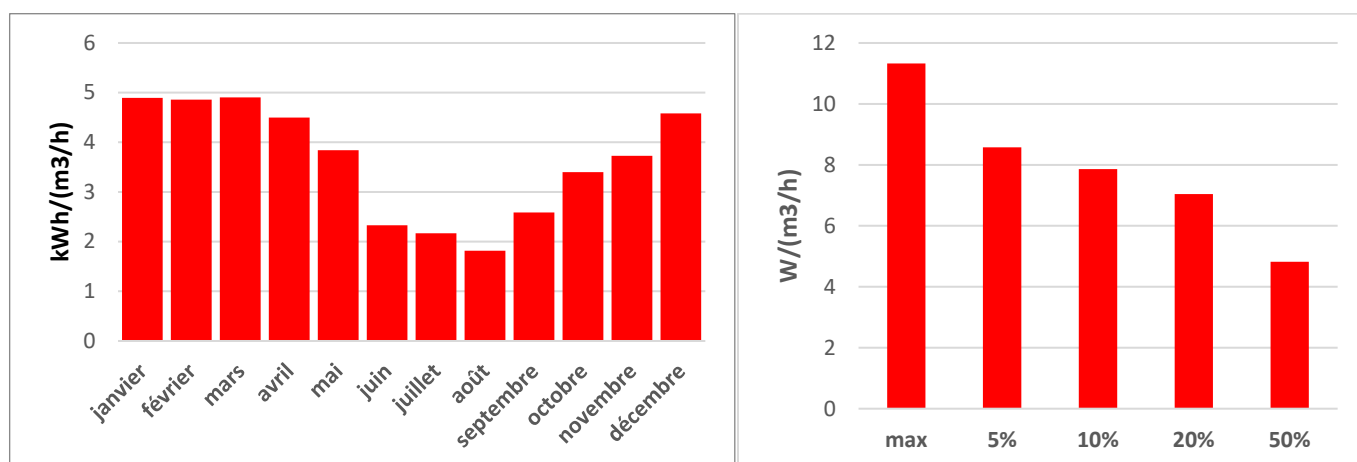


Figure 4.1.2.f – Bilans mensuels et monotone de la contribution du renouvellement d'air au besoin latent.

Notons que hors modulation dû au brassage le renouvellement d'air occasionne une charge plus importante sous forme latente que sensible. Ces deux charges peuvent être réduites grâce à l'utilisation d'échangeurs double-flux enthalpiques (air entrant pré-refroidi et pré-desséché au contact indirect de l'air extrait).

Etant donné que la température de consigne a été identifiée comme non influente, son impact n'est ici pas détaillé. En revanche, le débit de brassage lui module les apports latents via le ratio  $\frac{Q_v^b}{Q_v^b + Q_v}$ . L'évolution de celui-ci, appelé modulation du brassage, en fonction du taux de brassage  $\frac{Q_v^b}{Q_v}$  est donné dans le graphique suivant. Notons que mathématiquement cette courbe tend vers 1. Son choix permet donc de moduler le taux de déshumidification.

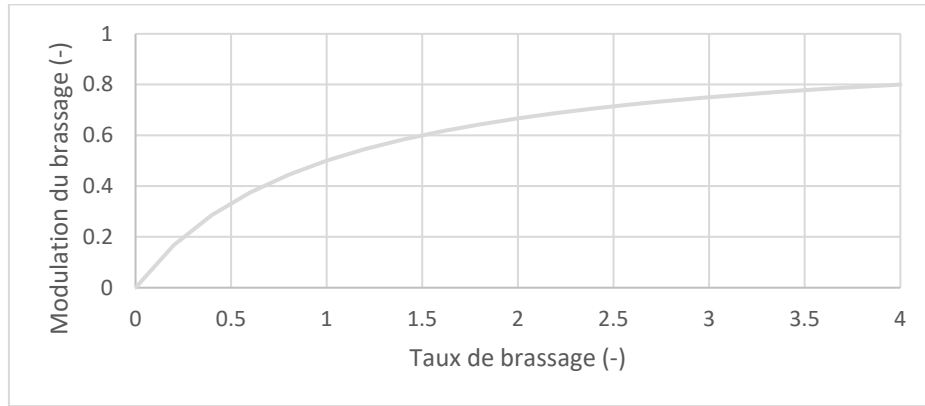


Figure 4.1.2.g – Evolution de la modulation du brassage en fonction du taux de brassage.

Rappelons que la puissance frigorifique latente est directement dépendante du besoin sensible via la régulation du débit de brassage ou de la température de soufflage. Son évolution en condition réelle ne peut donc être analysée indépendamment.

## 4.2 Analyse de sensibilité des cas d'études

Afin de vérifier la généralisation des résultats des cas génériques, l'analyse de sensibilité a été menée sur les cas d'études définis précédemment.

### 4.2.1 Comparaison des météo

Les météo des cas d'études et du cas générique n'étant pas les mêmes, les différences entre celles-ci peuvent influencer sur les résultats et leur comparabilité. C'est pourquoi celles-ci sont ici comparées, sur les périodes utilisées pour la calibration.

Code couleur :

- Météo de référence (cas générique) Gillot (PERENE) en bleu ;
- Aile de la faculté de droit en vert ;
- Antenne Ouest de la CAF en orange ;
- Entrepôt pharmaceutique en gris.

Les résultat correspondent aux valeurs journalières moyennes sur les différents mois. Ils sont encadrés par les valeurs maximale et minimale.

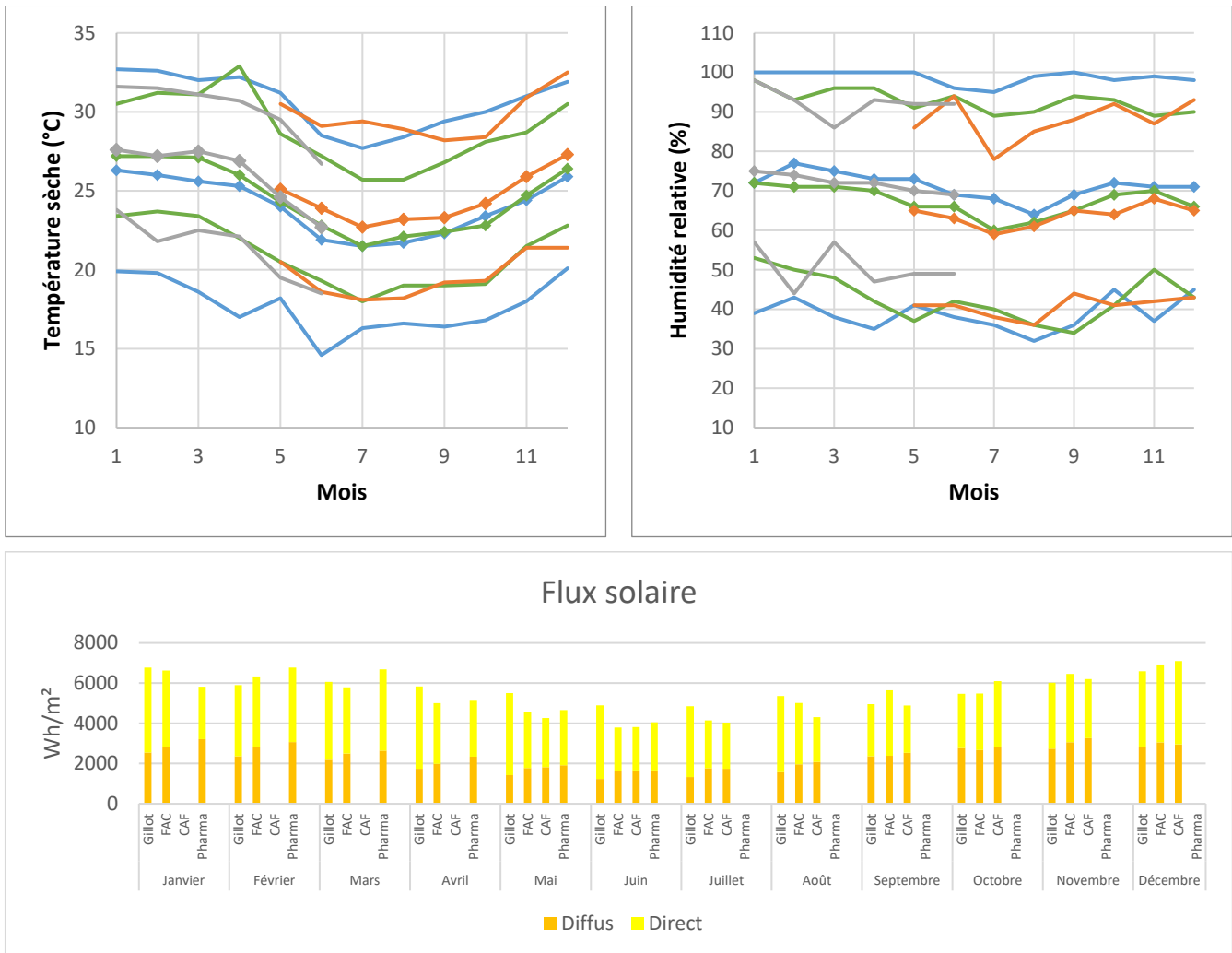


Figure 4.2.1 – Comparaisons des données météorologiques.

Dans les commentaires suivants, les données météorologiques sont comparées implicitement aux données météorologiques du cas de référence (Gillot).

Pour la faculté, la température extérieure s'avère en moyenne supérieure à la référence d'un degré sur la première moitié de l'année. Les autres valeurs étant très similaires. Les amplitudes maximales sont en revanche moins importante d'environ 4 °C. L'hygrométrie est plus faible toute l'année de 5 % en moyenne. Annuellement le diffus est plus important et le direct inversement. Globalement, l'énergie solaire reçue est sensiblement la même, mais est plus importante en période de climatisation.

Pour la CAF, la température extérieure s'avère en moyenne supérieure à la référence d'un degré sur tous les mois étudiés. Les maximums sont sensiblement identiques, mais la température minimale est plus importante d'environ 3 °C. L'hygrométrie est toujours plus faible de 5 % en moyenne. Globalement, l'énergie solaire reçue sur la période est sensiblement la même, avec toutefois plus de diffus et moins de direct. Mais en revanche l'énergie solaire reçue est plus importante en période de climatisation.

Pour la pharmacie, la température extérieure s'avère en moyenne supérieure à la référence d'un degré sur tous les mois étudiés. Les amplitudes maximales sont en revanche moins importante d'environ 4 °C, notamment à cause de températures minimales plus importantes. L'hygrométrie est sensiblement identique. Globalement, l'énergie solaire reçue sur la période est sensiblement la même, avec toutefois plus de diffus et moins de direct. Mais en revanche l'énergie solaire reçue est notablement plus importante en février et mars.

En définitive, les météo sont très similaires, mais on peut s'attendre à un impact plus important des paramètres affectant le flux solaire transmis et légèrement plus important pour ceux liés à la température extérieure.

#### 4.2.2 Impacts des variantes

##### Sur le besoin sensible

Le plan d'expérience du cas générique est appliqué aux modèles validés des cas d'études (paramétrisation de référence quasiment identique). L'impact des variantes est estimé par mètre carré de surface climatisée. Ces impacts sont comparés à ceux estimés par extrapolation des résultats de la méthode générique afin de vérifier sa représentativité. Ces estimations sont obtenues en multipliant les impacts relatifs aux différents types de parois par leur surfaces respectives dans les cas d'étude, et en les ramenant à la surface climatisée du cas d'étude.

Le code couleur est le même que précédemment. Dans le deuxième tableau, les couleurs éclaircies correspondent aux parts latentes (non-présentes dans le premier cas d'étude étant donné que le renouvellement d'air est géré par un système spécifique et qu'en conséquence l'impact est supposé neutre sur le système de climatisation).

- CAF Saint-Paul

Indicateur	Impacts pour le cas d'étude	Impacts estimés à partir du cas générique
Consommation sur les 8 mois d'étude (kWh/m <sup>2</sup> /an)		

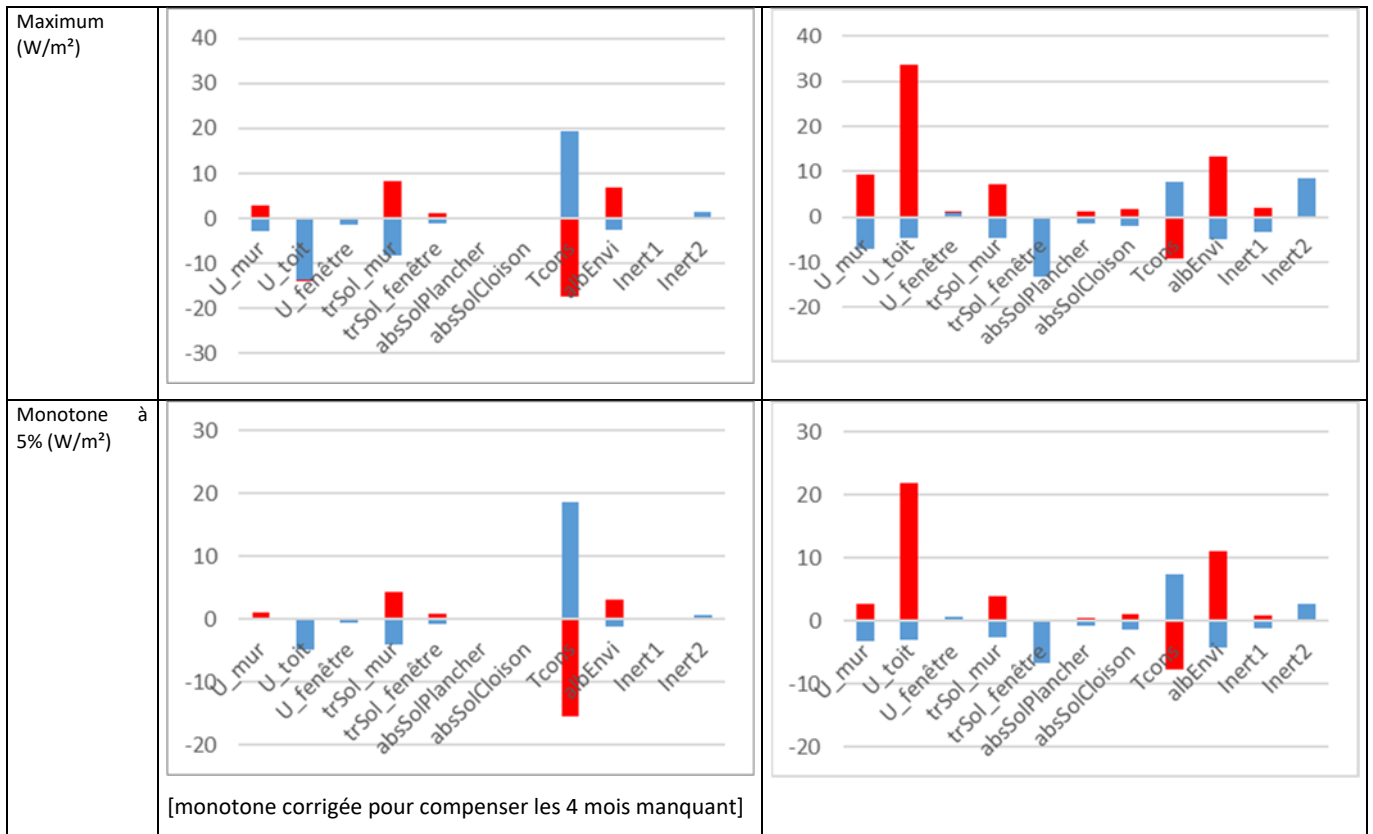


Figure 4.2.2.a – Impacts calculés et estimés pour la CAF

On observe que le cas générique permet de faire ressortir qualitativement, de façon relativement fiable les paramètres les plus impactant des cas générique.

L'impact de la température de consigne s'avère particulièrement sous-estimé, mais il convient de rappeler que le cas d'étude simplifié ne considère pas l'impact résultant sur le renouvellement d'air, contrairement au cas d'étude. De plus, la température généralement plus élevée de la météo mesurée contribue aussi à amplifier ce phénomène.

La surestimation de l'impact de l'albedo de l'environnement [albEnvi] et du facteur solaire du vitrage [trSol\_fenêtre] s'expliquent probablement par la présence de protections solaires externes dans le cas d'étude, qui réduisent le flux solaire incident et donc l'impact. Cette influence étant donc a priori plus importante que celle due à la présence de flux solaires plus important dans la météo mesurée. En revanche, cette dernière explique probablement l'impact sous-estimé du coefficient d'absorption solaire [trSol\_mur].

On observe par ailleurs que l'augmentation des déperditions du toit [U\_toit] n'a pas d'effet notable, ceci est dû à la présence de combles fortement ventilés qui réduit fortement le facteur solaire. L'ajout d'isolant permet toutefois de réduire encore les besoins frigorifiques, probablement par réduction du flux conducto-convectif généré par l'écart de température entre l'air intérieur et extérieur.

L'impact de l'inertie [Inert1 et Inert2] s'avère aussi plus faible, notamment sur la monotone, probablement parce que l'inertie est plus importante en proportion par rapport aux surfaces exposées à l'extérieure dans le cas d'étude.

Enfin, notons de façon générale que la période de climatisation est intermittente (saison et jour/nuit) dans les cas d'étude ce qui impact naturellement la monotone (valeurs nulles une plus grande partie de l'année). De plus, le foisonnement des contributions d'une orientation à l'autre et d'un type de parois à l'autre a aussi tendance à réduire les impacts du cas d'étude.

- Faculté de lettres – Saint-Denis

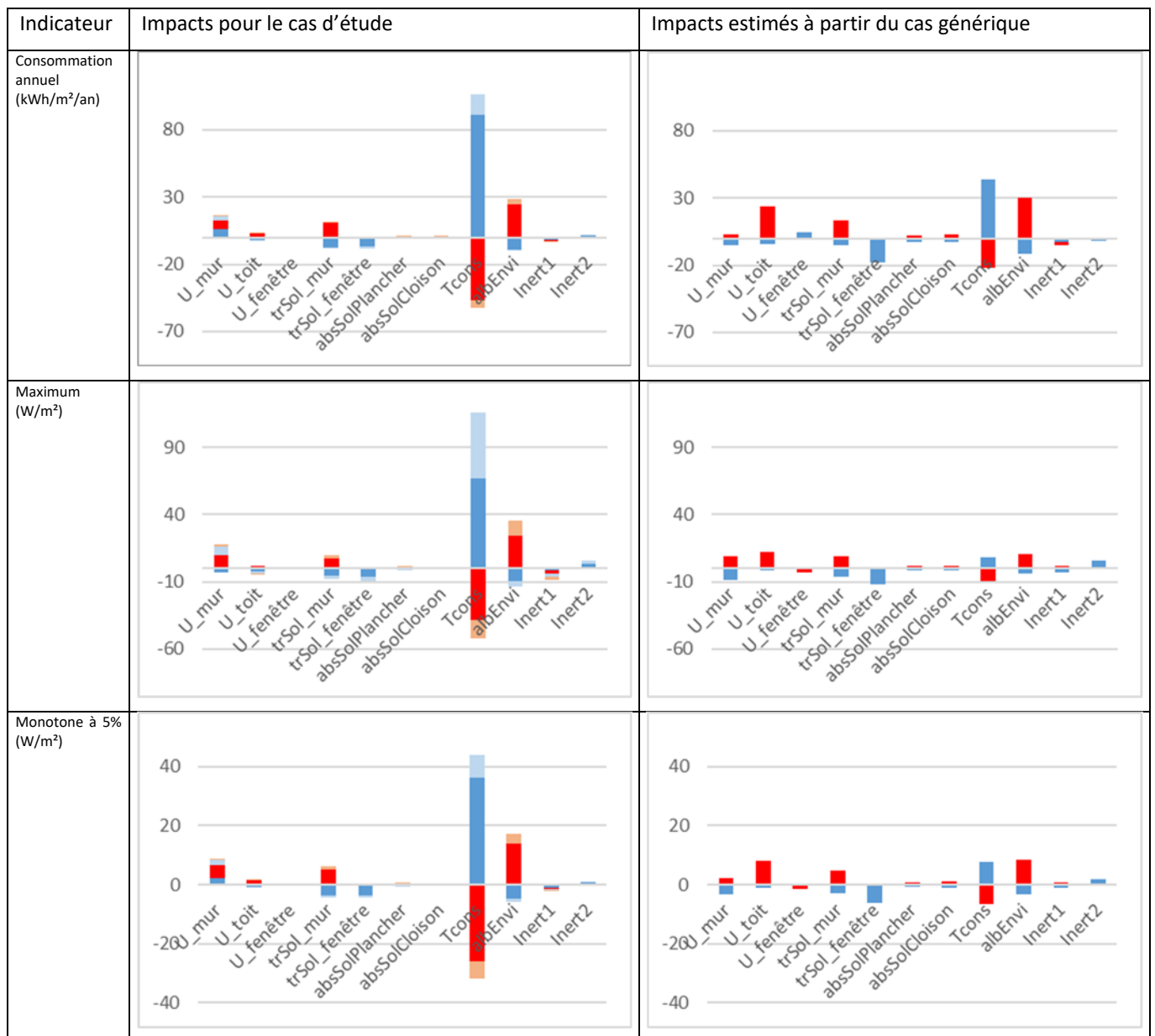


Figure 4.2.2.b – Impacts calculés et estimés pour la Faculté de lettres.

Pour le second cas d'étude, les observations précédentes sont aussi valables, mis-à-part que l'impact de l'albédo de l'environnement est ici sous-estimé, probablement à cause de la différence de météo. On observe aussi que, contrairement au cas précédent et au cas générique, la diminution des déperditions des parois opaques entraîne une augmentation des besoins de climatisation. Cet effet est probablement dû à l'effet de serre mentionné dans l'analyse du cas générique pour les parois vitrées, impactant les parois opaques car elles ne sont ici pas virtuellement dissociées. Rappelons que la ventilation nocturne pourrait limiter ce phénomène.

Dans ce cas, il est possible d'étudier l'impact sur la puissance frigorifique latente. Son évolution est relativement « mécanique » : conformément à l'équation établie précédemment, l'augmentation ou la diminution des besoins sensibles augmente ou diminue respectivement le taux de brassage et donc la condensation.

- Entrepôt pharmaceutique – Saint-Gilles les Bains

Le dernier cas d'étude, l'entrepôt pharmaceutique, s'éloigne du cas générique de référence en termes de composition des parois : les parois étant pour la plupart isolées. En conséquence, le plan d'expérience a été légèrement modifié comme suit (valeurs retenues dans le cas générique barrées) :

Phénomène	Paramètre	Borne basse	Valeur de référence	Borne haute
<b>Déperditions des parois</b> [Uparois]	U des murs verticaux extérieurs (W/m <sup>2</sup> /K)	<del>0,7</del> -	<del>2,8</del> 0,46	<del>3,8</del> 1,78 <i>Composé intégralement de parpaings</i>
	U du toit (W/m <sup>2</sup> /K)	<del>0,4</del> -	<del>0,7</del> 0,31	<del>2,8</del> 0,7 <i>Suppression de l'isolant</i>
	U des parois vitrées (W/m <sup>2</sup> /K)	3	<del>5,8</del> 4,6	7
<b>Flux solaire transmis</b> [trSol]	Coefficient d'absorption solaire du toit (-)	<del>0,2</del> -	0,4	0,7
	Coefficient d'absorption solaire des murs (-)	<del>0,4</del> -	<del>0,7</del> 0,4	± 0,7
	Facteur solaire des vitrages (-)	<del>0,49</del> -	<del>0,86</del> 0,35	0,86
<b>Flux solaire absorbé plancher</b> [absPlancher]	Coefficient d'absorption solaire du sol (-)	0,4	<del>0,7</del> 0,73	1
<b>Flux solaire absorbé cloisons</b> [absCloison]	Coefficient d'absorption solaire des cloisons (-)	0,2	<del>0,4</del> 0,5	0,7
<b>Température de consigne</b> [Tcons]	Température de consigne (°C)	<del>22</del> 21	<del>26</del> 25	<del>30</del> 29
<b>Flux solaire réfléchi par l'environnement</b> [albEnvi]	Albédo de l'environnement (-)	0	0,2	0,7



<b>Masse inertielle</b> [Inert1]	Epaisseur de la dalle béton sous chappe (cm)	±0 5	±0 10	±0 20
<b>Propriétés inertielles</b> [Inert 2]	Matériaux	Plancher de 20 cm de bois Plancher bois de 7 cm	Plancher de 20 cm de béton Chappe béton de 7 cm	

Figure 4.2.2.c – Adaptation du plan d’expérience.

L’adaptation du plan d’expérience a été fait de sorte à se rapprocher des intervalles de variations du cas générique.

De plus, l’orientation du bâtiment est relativement importante (35° par rapport aux directions cardinales), ce qui peut affecter sensiblement les valeurs des impacts liées aux flux solaires. En revanche, la climatisation étant en marche toute l’année (hors nuits) et les apports internes étant négligeables par rapports aux autres charges, on se rapproche en ce sens du cas générique.

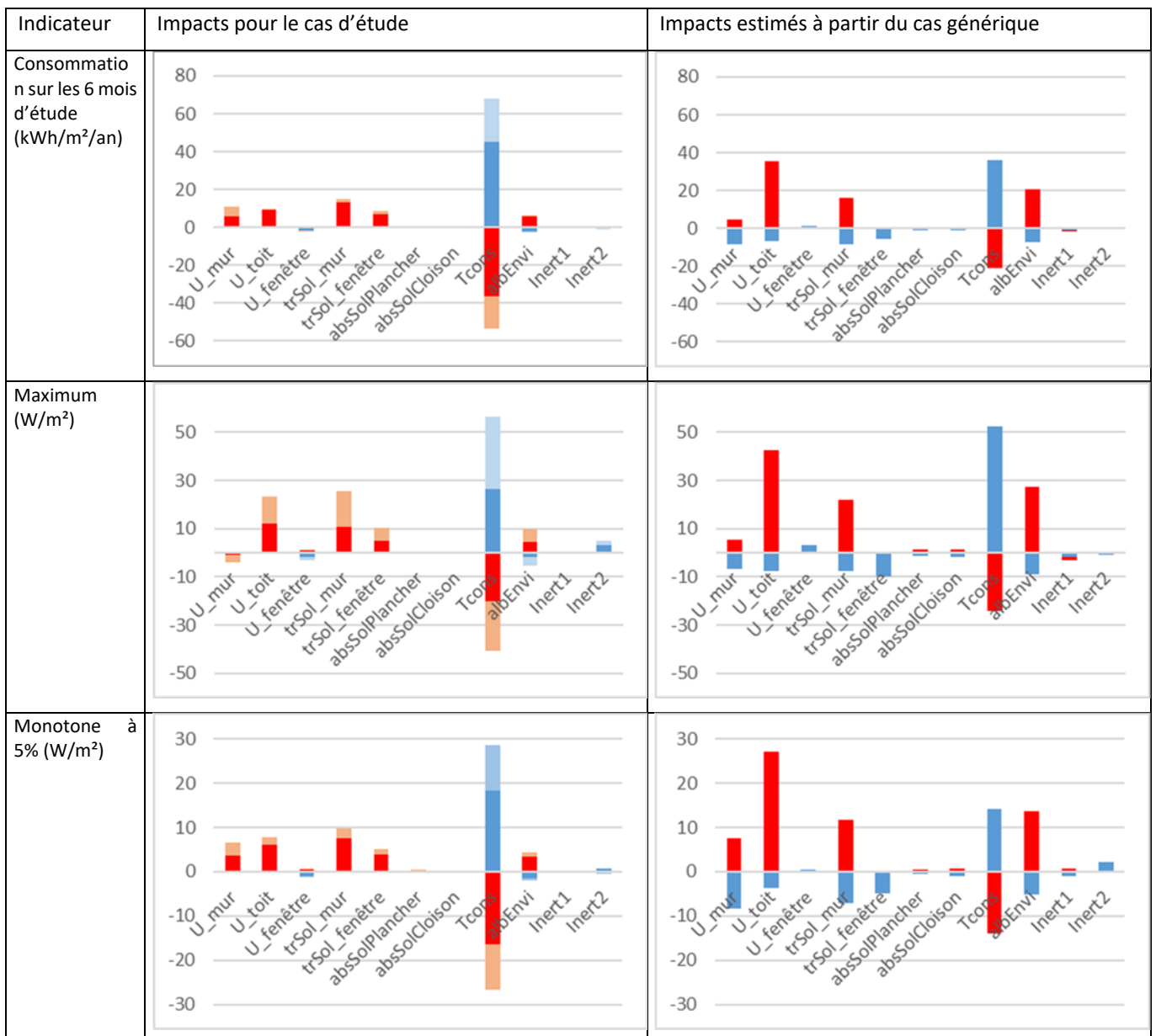


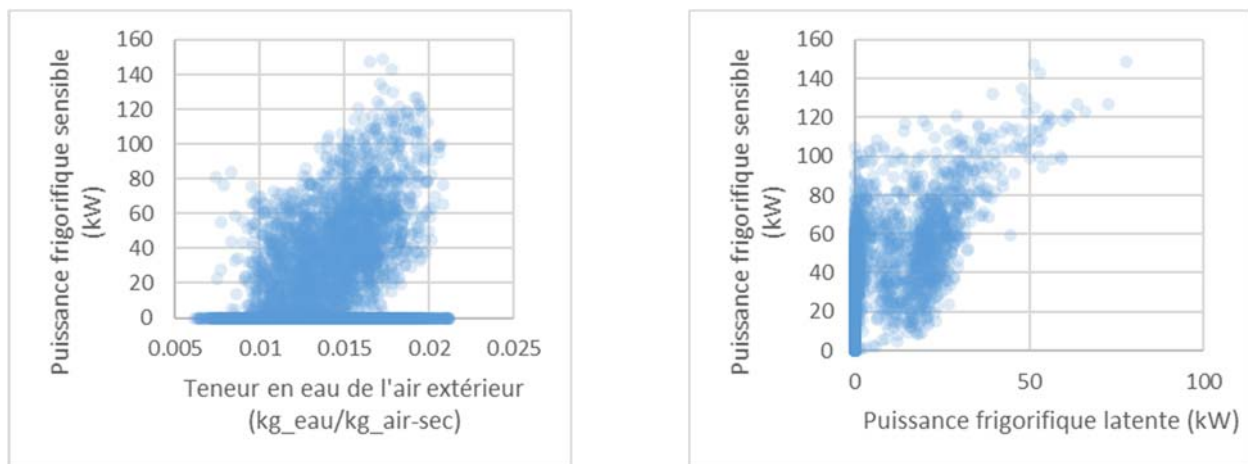
Figure 4.2.2.d – Impacts calculés et estimés pour l'entrepôt pharmaceutique.

Malgré les limites évoquées ci-dessus, on observe que les résultats du cas générique s'extrapolent de façon aussi satisfaisante que dans les cas précédents.

### Sur le besoin latent

Comme mis en évidence dans la partie méthodologique, la part latente ne peut être étudiée de la même façon que le besoin sensible de façon « décomposée ». Il est donc impossible d'estimer a priori celle-ci à partir du cas générique. En revanche, les cas d'étude ont permis d'estimer cette part. En complément, il est intéressant d'étudier la coïncidence des maximums latent et sensible.

Faculté de lettres



Entrepôt pharmaceutique

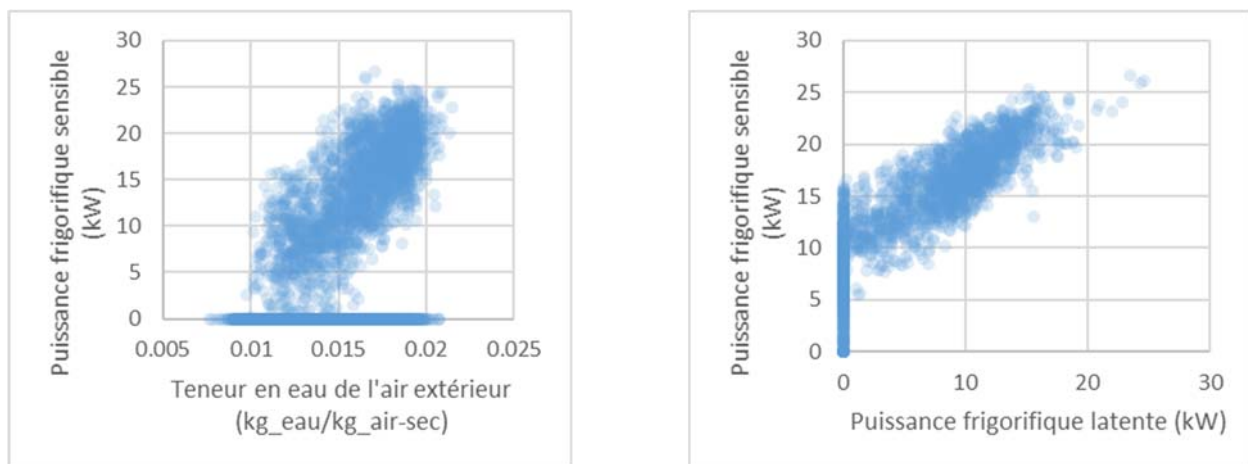


Figure 4.2.2.e – Impacts calculés et estimés pour l'entrepôt pharmaceutique.

On observe que les maximums de la teneur en eau de l'air extérieur coïncident globalement en tendance avec les maximums de la puissance sensible. Cette correspondance n'est pas exacte pour les plus grandes valeurs, mais on observe que cet écart « n'empêche » pas que les plus grandes valeurs de la puissance frigorifique sensible et latente coïncident. L'impact de la teneur en eau sur la puissance frigorifique latente n'est donc pas nettement opposé à celui dû à la modulation du débit de brassage. Ainsi, pour le dimensionnement, il est possible de considérer que la puissance latente est maximale lors des maximums de la puissance totale.

### 4.3 Conclusions

La confrontation des **résultats de l'analyse de sensibilité du cas générique** avec ceux des analyses de sensibilité des cas d'études montre que ceux-ci s'avèrent tout à fait **représentatifs** et **généralisables** dans le sens où ils permettent d'estimer les impacts de cas réels par recombinaison.

Ces deux caractéristiques s'avèrent d'ailleurs **robustes** à l'utilisation de **données météorologiques** réelles et issues d'autres sites, mais aussi à l'utilisation de **typologies constructives** relativement différentes du cas de référence.

Par ordre d'importance, les paramètres ayant été identifiés comme les plus impactants sont :

1. La **température de consigne** ;
2. L'albedo de l'environnement (et plus généralement l'estimation du **flux solaire incident** avec l'ombrage) ;
3. Les **facteurs solaires** des parois opaques (dépendant du coefficient de déperdition et du coefficient d'absorption solaire) et des parois vitrées.

Par ailleurs, intervenant directement sur la puissance frigorifique sensible et latente, la valeur des **apports internes** et des **débits de renouvellement d'air** (mécanique et naturel) sont à estimer avec précaution. L'estimation des apports internes sensibles fait l'objet de l'inventaire réalisé en annexe 3. Ces valeurs se veulent indicatives mais ne dispensent pas d'une estimation plus précise dès lors que cela est possible.

Les propriétés inertielles, le coefficient de déperdition des vitrages, les coefficients d'absorption solaire des surfaces internes et la température de soufflage ayant pour leur part un impact bien moindre.

Enfin, il a été mis en évidence que pour le dimensionnement, il est possible de considérer que la part latente est quasiment maximale simultanément à la puissance frigorifique totale.

## 5 Indicateurs de dimensionnement

Le dimensionnement d'un système de climatisation est usuellement défini en fonction de la puissance maximale qu'il devra fournir.

Nous avons vu précédemment comment mieux dimensionner les systèmes de climatisation en estimant de façon plus précise et fiable les besoins frigorifiques du bâtiment.

Nous étudierons ici la possibilité de définir de nouveaux indicateurs de dimensionnement permettant d'optimiser celui-ci pour un service rendu équivalent. Autrement dit, nous chercherons à répondre à la question suivante : « Est-il possible de réduire le dimensionnement du système frigorifique basé sur les besoins maximums sans impacter notablement le confort. Si oui, dans quelle mesure ? »

### 5.1 Méthodologie

#### 5.1.1 Démarche

Pour répondre à la question précédente, nous avons repris deux modèles précédents et réduit progressivement leur dimensionnement en analysant l'impact sur le confort.

Dans le premier modèle, celui de l'entrepôt pharmaceutique, nous nous sommes intéressés aux besoins idéaux. La réduction du dimensionnement revient dans ce cas à plafonner la puissance maximale délivrée par le système frigorifique. Concrètement, dans ce modèle l'air soufflé est toujours ramené à 9°C, la limitation provient donc du débit de brassage des ventilo-convecteurs. Ce modèle étant mono-zone, le confort est quantifié pour une seule pièce.

Le second cas, l'aile de la faculté de lettres, est plus complexe car il est multi-zones et le système frigorifique modélisé de façon détaillée avec son groupe froid, sa boucle d'eau glacée et ses ventilo-convecteurs (émetteurs). La réduction du dimensionnement revient ici à réduire la puissance nominale du groupe froid et donc sa capacité à maintenir la boucle d'eau glacée à son régime de température défini.

#### 5.1.2 Indicateur d'inconfort

L'inconfort apparaît lorsque la puissance apportée par le système frigorifique s'avère insuffisante pour compenser les charges thermiques (apports internes, flux solaire transmis, etc.) ce qui se traduit par une élévation de la température d'air intérieur au-delà de la température de consigne.

En supposant que la température de consigne est une limite de confort, tout dépassement entraîne un inconfort. Le nombre d'heure total de dépassement est généralement utilisé, mais cet indicateur ne fournit aucune information sur l'« intensité » de ce dépassement. Il a donc été choisi d'utiliser les deux indicateurs suivants :

- Le dépassement maximal (exprimé en °C)
- Le dépassement cumulé consécutif maximal (exprimé en °C.h)

Le premier indicateur permet potentiellement de déterminer quelle réduction de puissance peut entraîner une élévation de température « supportable » si l'on suppose une marge de confort (potentiellement assurée par un système d'appoint tel qu'un brasseur d'heure). Le second se veut représentatif du ressenti global en cumulant durée et élévation de température, dans le sens où une élévation importante mais ponctuelle peut-être plus supportable qu'une élévation plus faible mais continue sur une plus longue période.

## 5.2 Résultats

### 5.2.1 Cas simplifié

Afin de réduire la complexité des systèmes de refroidissement et faciliter l'analyse, seuls les besoins idéaux, donc théoriques, de froid sont pris en compte. Ces besoins correspondent à la puissance exacte nécessaire pour maintenir la température de consigne, sans limitation potentielle due à la régulation ou aux dimensionnements des systèmes de distribution ou de production.

On observe sur les figures suivantes qu'une limitation de la puissance maximale se traduit directement par une coupure nette de la courbe de charge et de la monotone<sup>13</sup>. Les limitations entraînent toutefois un léger « renflement » de la monotone, dû à une puissance frigorifique plus importante le reste du temps. Cette augmentation, malgré un dimensionnement plus faible, occasionne une très légère augmentation de l'énergie frigorifique annuelle (1 à 2%) probablement non-significative, et largement compensée par la réduction due à la coupure pour des limitations plus importantes (supérieure à 30%).

Une augmentation du latent s'observe lors des relances du système de froid (déshumidification plus importante), et occasionne en partie les effets de bords observés (puissances supérieures au seuil imposé) à cause de probables limites de la résolution numérique lors de ces instants.

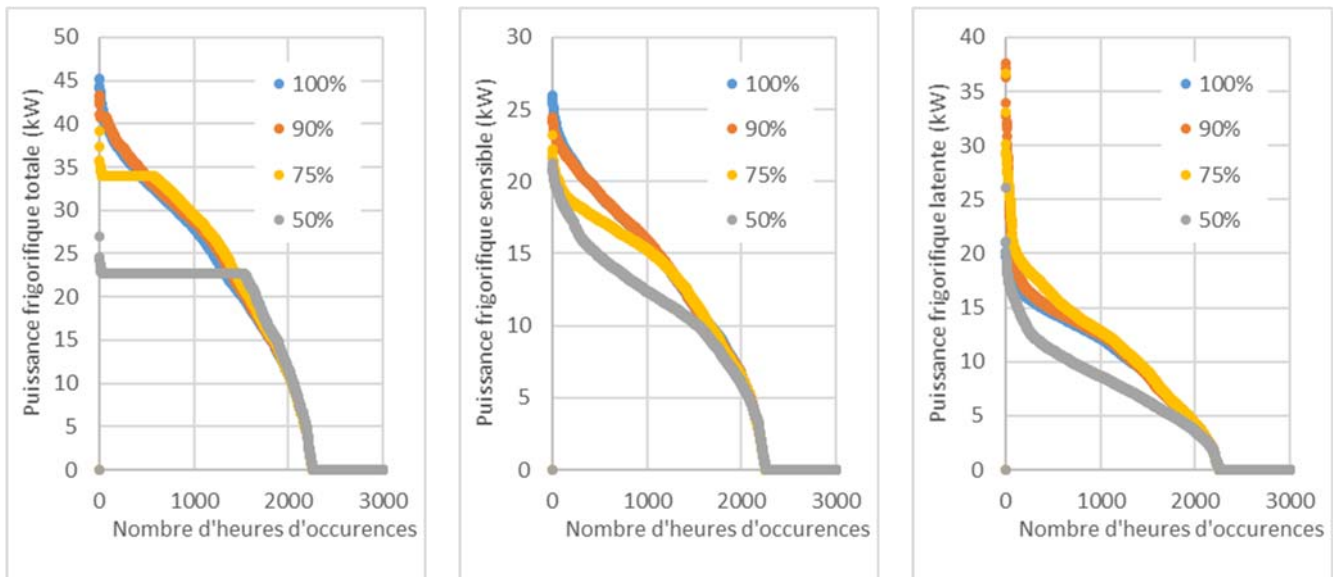


Figure 5.2.1.a – Evolution des monotones de puissance respectivement totale, sensible et latente pour différentes limitations de puissance.

Une limitation de puissance à 99 % occasionne directement un dépassement maximal de 1,5 °C à mettre sur le compte du changement de la résolution du modèle avec l'instauration d'une limite de puissance. L'augmentation de ce dépassement maximal suit ensuite une relation quasi-linéaire avec une élévation de 0,5°C par réduction de 10 %. En supposant une marge de confort de 2°C, le dimensionnement pourrait être réduit de 10%. Ce résultat n'est certainement pas généralisable, car l'élévation de la température dépend a priori de l'inertie de la zone considérée.

En termes de ressenti global, le dépassement cumulé consécutif maximal augmente lui aussi linéairement avec le niveau de réduction, mais sans rupture initiale majeure.

<sup>13</sup> Mis-à-part quelques effets de bords concernant une dizaine de valeurs.

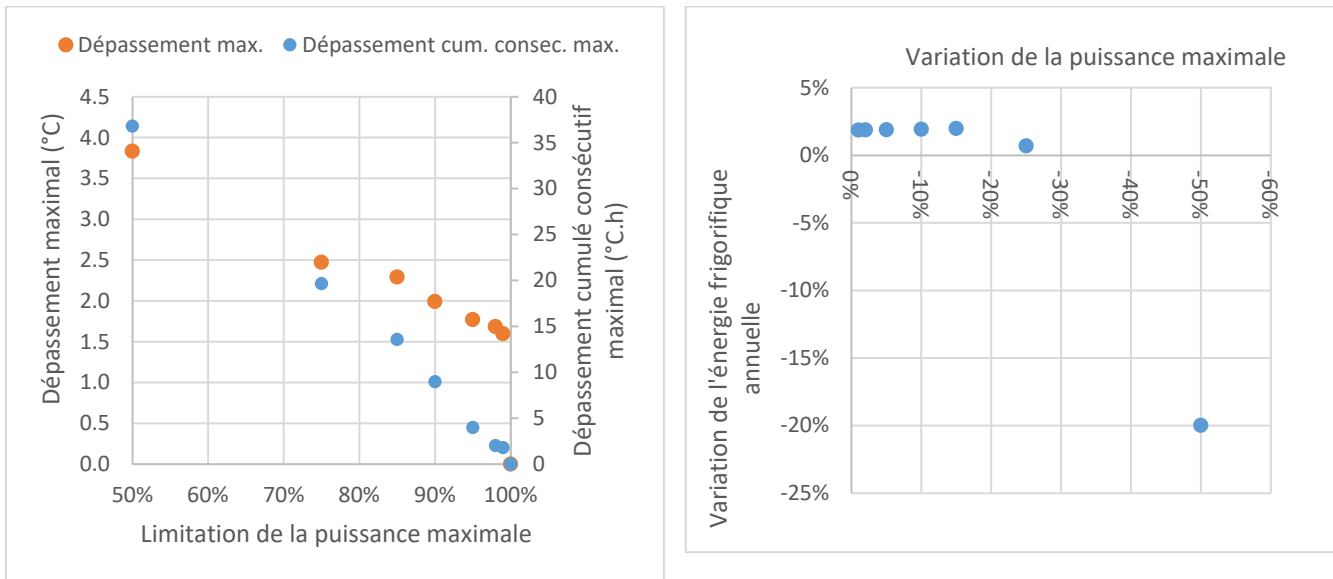


Figure 5.2.1.b – Impacts des limitations de puissance sur la température intérieure et sur le bilan énergétique annuel.

### 5.2.2 Cas d'étude

Dans ce cas d'étude le système est modélisé tel que décrit dans l'étape de calibration. La régulation de la puissance apportée est gérée uniquement au niveau des émetteurs par la variation du débit des ventilo-convecteurs.

Contrairement à précédemment, la réduction de dimensionnement se traduit par une diminution moins nette (pas de palier) et occasionne systématiquement une réduction de l'énergie frigorifique annuelle, mais cinq fois moindre que la réduction de puissance. De plus, l'inconfort généré par les premiers niveaux de réduction du dimensionnement, jusqu'à 10%, s'avère extrêmement faible (de l'ordre de 0,1°C par réduction de 10% pour le dépassement maximal).

On observe en effet que la réduction du dimensionnement affecte bien plus la puissance frigorifique latente que sensible. Ceci s'explique par le fait que, lors de forts besoins, la réduction du dimensionnement du groupe froid se traduit par une élévation de la température d'entrée de la boucle d'eau glacée (puissance insuffisante pour la redescendre au régime de température voulu) et donc par une augmentation de température de la batterie froide qui entraîne une diminution de la condensation. Par comparaison, dans le cas simplifié précédent, la température de soufflage restant inchangée, la puissance est directement « bridée » via le débit des ventilo-convecteurs.

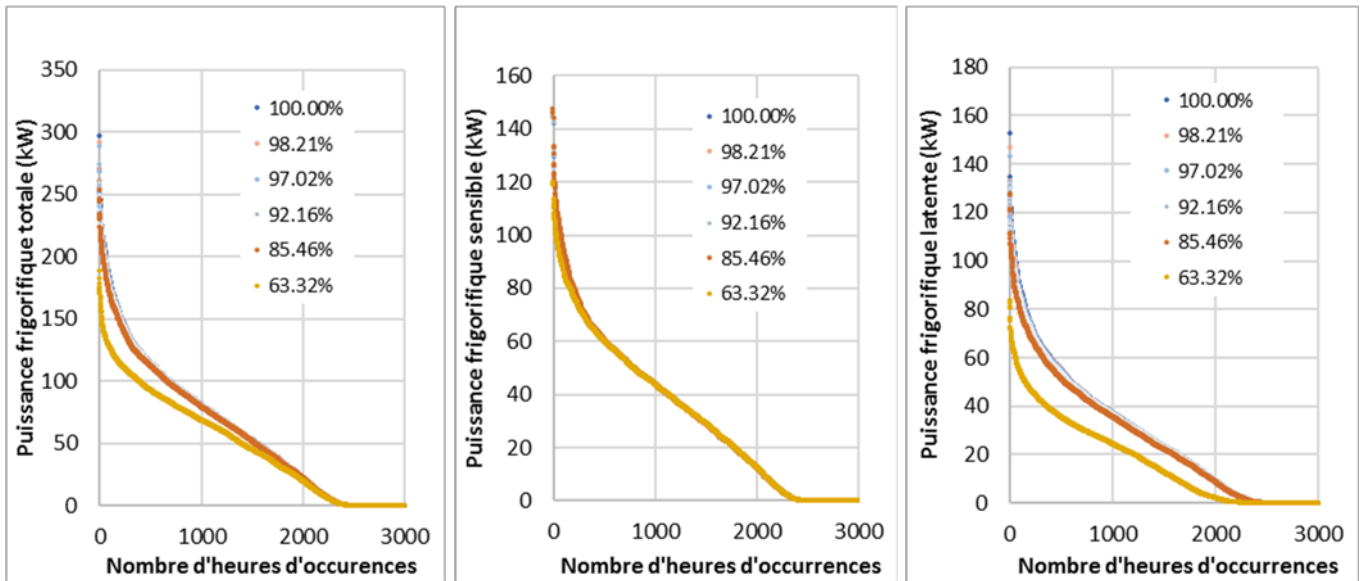


Figure 5.2.2.a – Evolution des monotones de puissance respectivement totale, sensible et latente pour différentes limitations de puissance.

Notons que cette augmentation de la température d'eau glacée augmente le débit du ventilo-convecteur pour compenser l'écart de température plus faible entre l'air intérieur et la batterie froide et délivré ainsi la même puissance sensible. Dans le modèle, une marge volontairement conséquente a été définie pour le débit du ventilo-convecteur afin de permettre ce « rattrapage ». Mais, suivant les dimensionnements réels, il est probable que le débit de la cassette sature plus tôt, et entraîne alors une élévation de température bien plus importante, comme dans la deuxième partie de la courbe (2,5°C par réduction de 10%). Concernant le ressenti global, l'évolution du dépassement cumulé consécutif maximal est relativement similaire.

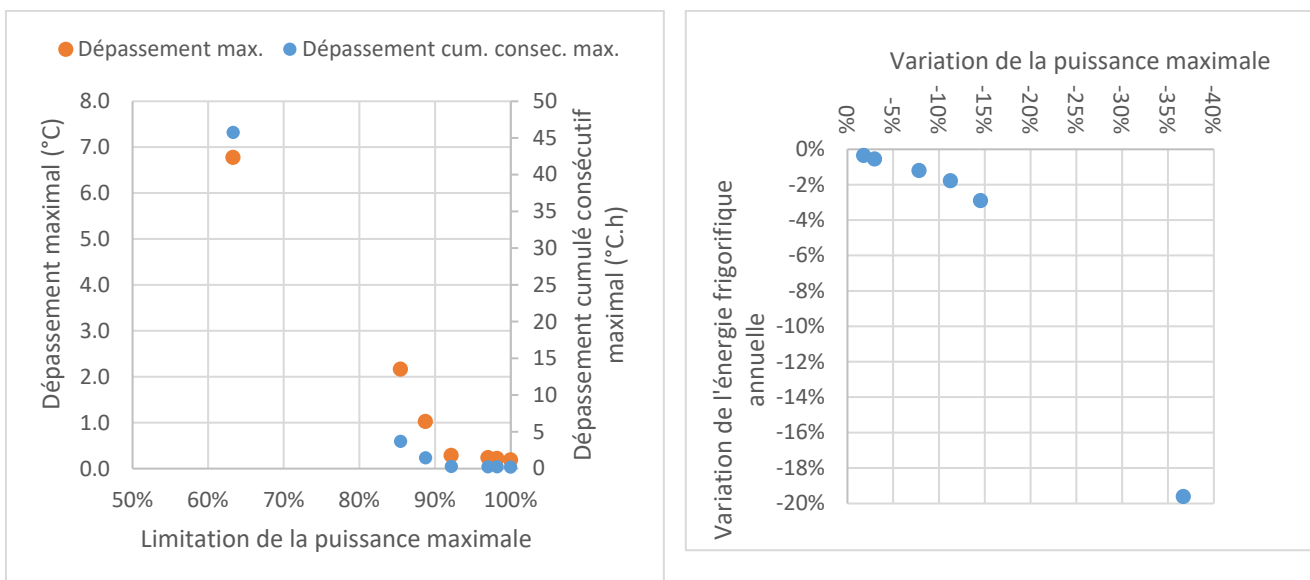


Figure 5.2.2.b – Impacts des limitations de puissance sur la température intérieure et sur le bilan énergétique annuel.

Une régulation sur le débit de la boucle d'eau glacée plutôt que sur le débit du ventilo-convecteur devrait avoir des conséquences similaires (élévation de la température de l'eau glacée), avec probablement une diminution plus marquée de la puissance frigorifique grâce à l'absence de l'augmentation du taux de brassage (débit du ventilo-convecteur).

En définitive, une modélisation plus détaillée des systèmes montre que la réduction de la capacité du groupe froid :

- d'une part, ne se traduit pas par un plafonnement net de la monotone ;
- et d'autre part que l'inconfort généré se répercute sur l'hygrométrie plus que sur la température.

Toutefois ce deuxième constat est à généraliser avec précaution car il suppose que les systèmes de régulation aient de la marge pour rattraper l'élévation de la température d'eau glacée, marge qui devrait théoriquement être faible, car outre le foisonnement, les émetteurs n'ont en pratique pas à être surdimensionnés. De plus, suivant l'organisation et la régulation de la distribution, l'inconfort généré peut être répercuté de façon plus importante dans certaines zones que d'autres.

Pour avoir un ordre de grandeur, le foisonnement fait que, d'après les résultats calibrés de simulation, la puissance maximale nécessaire à l'ensemble des émetteurs pour couvrir les besoins est plus importante de 23 % par rapport à la puissance maximale nécessaire au groupe froid centralisé.



### 5.3 Conclusions

En définitive, il semble difficile d'extrapoler une conclusion générale des résultats obtenus tant ceux-ci dépendent des systèmes utilisés, de leur paramétrage et de leur agencement mais aussi de la conformation du bâtiment.

Nous avons vu que sous certaines conditions, la limitation du dimensionnement de quelques pourcents (environ jusqu'à 5 %) pouvait n'avoir que peu d'incidence sur la température intérieure, tant que le dimensionnement de l'émetteur a de la marge, ce qui peut être le cas grâce au foisonnement. Toutefois rappelons que le confort dépend aussi de l'hygrométrie, et que dans cette configuration celle-ci tend à augmenter et donc à dégrader le confort. De plus, il dépend aussi de la température des parois délimitant la zone, or celles-ci augmentent en journée sous l'effet des charges internes et climatiques. Il semble donc préférable de conserver cette potentielle marge de dimensionnement.

Cependant, une étude plus précise d'un cas particulier avec une STD pourrait permettre d'ajuster plus finement l'installation à condition de connaître précisément le fonctionnement et l'architecture des systèmes et en prenant en compte des critères de confort exhaustifs (hygro-thermo-radiatif)

En revanche, d'un point de vue numérique, étant donné le pas de temps horaire, il nous semble que les cinq niveaux de puissance les plus élevés ne sont pas significatifs et représentatifs d'une réalité physique. On observe en effet sur la figure ci-dessous qu'ils se distinguent nettement

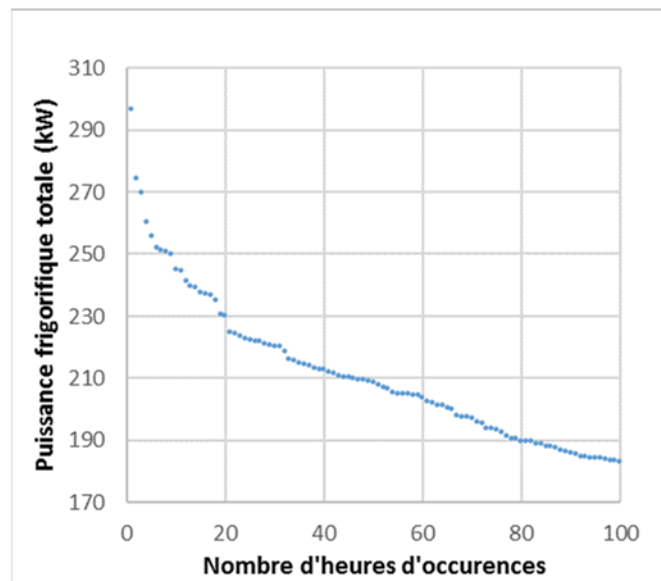


Figure 5.2.3 – Zoom de la monotone du second cas d'étude.

Compte tenu de ces éléments, de l'incertitude relative du modèle, de la réalité des technologies disponibles, pour dimensionner les installations frigorifiques, il nous semble pertinent de nous baser sur **la cinquième plus grande valeur des besoins frigorifiques totaux** calculés par la STD.

On veillera par ailleurs à exclure les pics simulés ayant lieu lors de la relance matinale du système de climatisation. En effet, au pas de temps horaire ces pics sont estimés de façon trop grossière, et sont dus à la relance du système et non directement à la conception du bâtiment. Dans la réalité, ceux-ci peuvent être limités avec une régulation adéquate en anticipant le redémarrage du système.

Les conclusions de cette partie, en complément avec celle de la partie précédente (analyse de sensibilité) ont servi à l'établissement des recommandations fournies en annexe 3.

## 0 Annexe 1 : Décomposition des besoins du bâtiment

L'objectif de la décomposition des besoins du bâtiment est de pouvoir déduire ceux-ci pour un cas quelconque par « recombinaison » de sous-éléments génériques « décomposés ». La validité de cette méthodologie est étudiée en détail dans cette annexe.

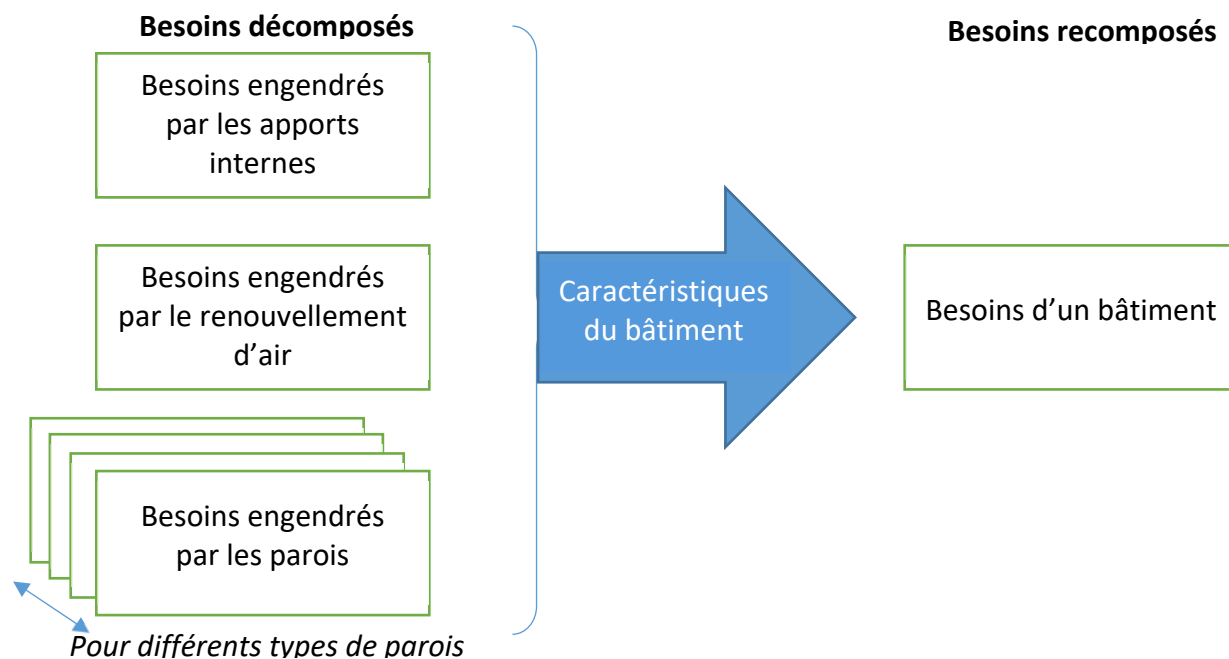


Figure A1 – Représentation schématique de la méthodologie de décomposition

### 0.1 Préliminaires théoriques

La température d'une zone thermique est affectée par :

- L'énergie dissipée par les apports internes (métabolisme humain et appareils électriques notamment)  $Q_{int}$  ;
- Le flux de chaleur généré par le renouvellement d'air  $Q_{ventil}$  ;
- Et les flux de chaleur transmis par les parois la délimitant  $Q_p$ .

Ces derniers dépendent d'une part de l'écart de température entre intérieur et extérieur et d'autre part des flux radiatifs absorbés sur les faces extérieures et intérieures (notamment via la transmission des vitrages) des parois. De surcroît, dû aux phénomènes d'inertie, la dynamique de ces flux est affectée par son « historique thermique ».

Pour maintenir une température de consigne fixe (évolution dite forcée), le système de climatisation doit fournir à tout instant une puissance sensible  $P_{clim}$  compensant exactement les flux de chaleurs affectant la zone :  $P_{clim} = Q_{int} + Q_{ventil} + \sum_i Q_{p_i}$  [Eq-A].

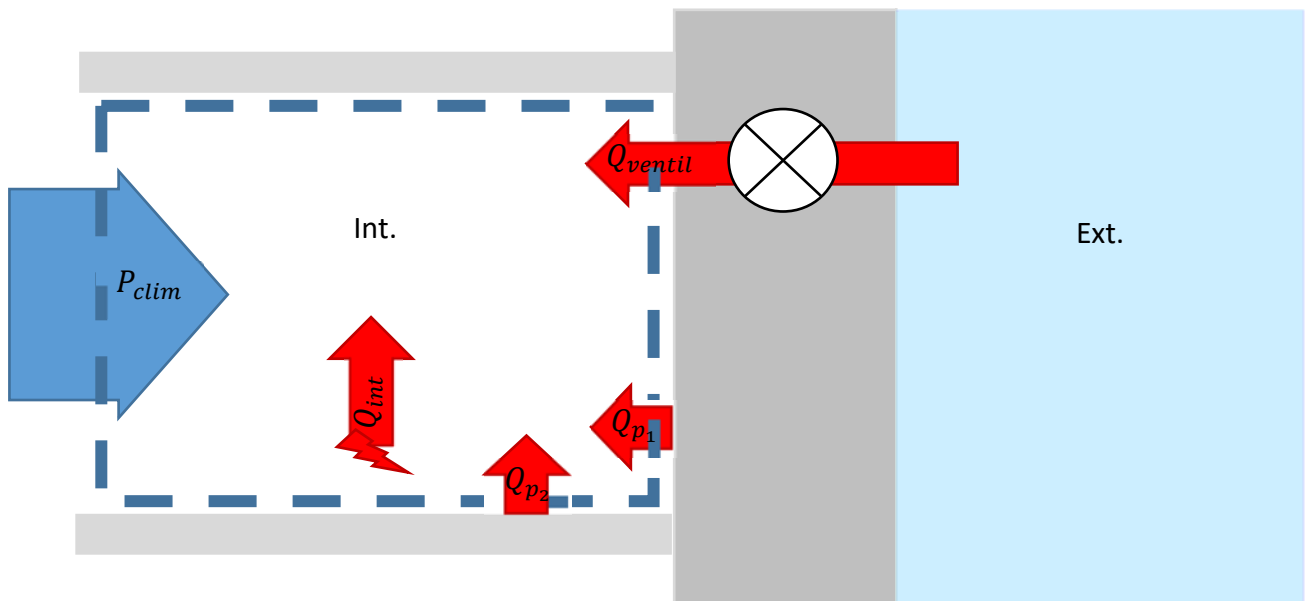


Figure A1.1.a – Représentation schématique du bilan énergétique d'une zone thermique.

Parmi ces flux, généralement  $Q_{int}$  est connu de façon explicite, indépendamment des autres grandeurs (défini a priori suivant des scénarios usuels). En évolution forcée, la température intérieure étant fixée,  $Q_{ventil}$  peut aussi être déterminé de façon explicite, ne dépendant que du débit de ventilation et de la température extérieure, données d'entrées du modèle. En revanche  $Q_p$  ne peut pas être déterminé de façon explicite, dépendant de « l'historique thermique » et du bilan des autres surfaces environnantes via les échanges grandes longueurs d'ondes, en plus des données météorologiques d'entrée (température extérieure et flux solaires). Son estimation nécessite donc une résolution complète et dynamique du problème thermique.

De façon plus détaillée,  $Q_p$  provient du bilan thermique de la couche superficielle des parois internes (voir schéma ci-dessous) :  $Q_p = Q_{rad} + Q_{cd-i}$  avec  $Q_{rad}$  les radiations (principalement solaire) absorbée par la face intérieure et  $Q_{cd-i}$  le flux conductif au niveau de la surface interne de la paroi. Dans les couches internes apparaissent  $Q_{stck}$  le flux stocké dans la couche contribuant à sa montée en température.

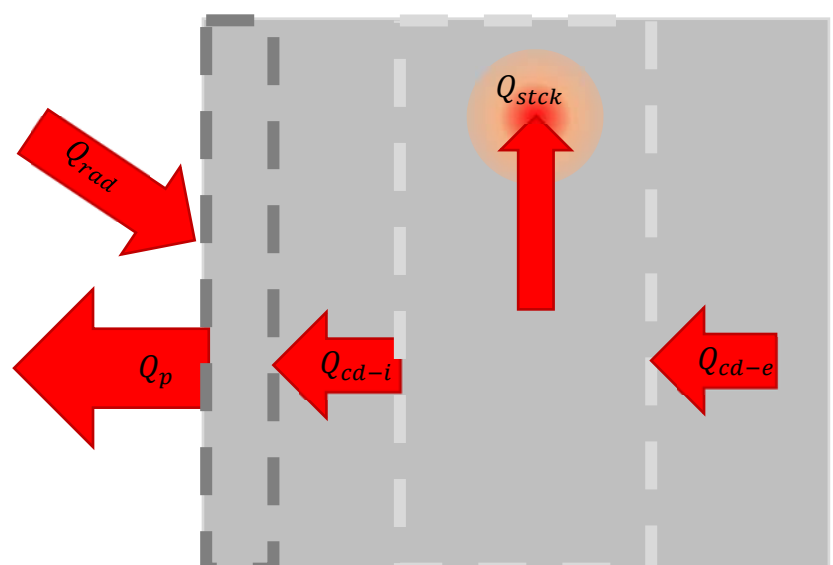


Figure A1.1.b – Représentation schématique du bilan énergétique superficiel d'une paroi.

Il paraîtrait intéressant d'extraire de  $Q_p$  la part provenant du flux solaire transmis par les vitrages  $Q_{rad}$  afin de relier directement le besoin de froid  $P_{clim}$  à celle-ci, qui peut être facilement estimée directement à partir des données météorologiques et d'informations géométriques. Cependant, il ne peut y avoir de lien direct entre ces deux grandeurs du fait de l'inertie qui atténue, déphase et étale la restitution du flux solaire absorbé par les surfaces internes et ce selon les propriétés thermo-physiques (conductivité et capacité calorifique) des matériaux les constituants comme le montrent les figures suivantes. On observe en effet que la part du flux solaire transmise à la zone par convection n'est pas constante. Une part non négligeable de l'énergie solaire est aussi transmise par conduction par la paroi. Cette part pourra être relarguée par convection dans la zone ultérieurement ou transmise de l'autre côté dans la zone adjacente, ou à l'extérieur le cas échéant. Autrement dit, il est difficile d'établir une relation directe reliant ces différentes puissances en fonction du temps<sup>14</sup>.

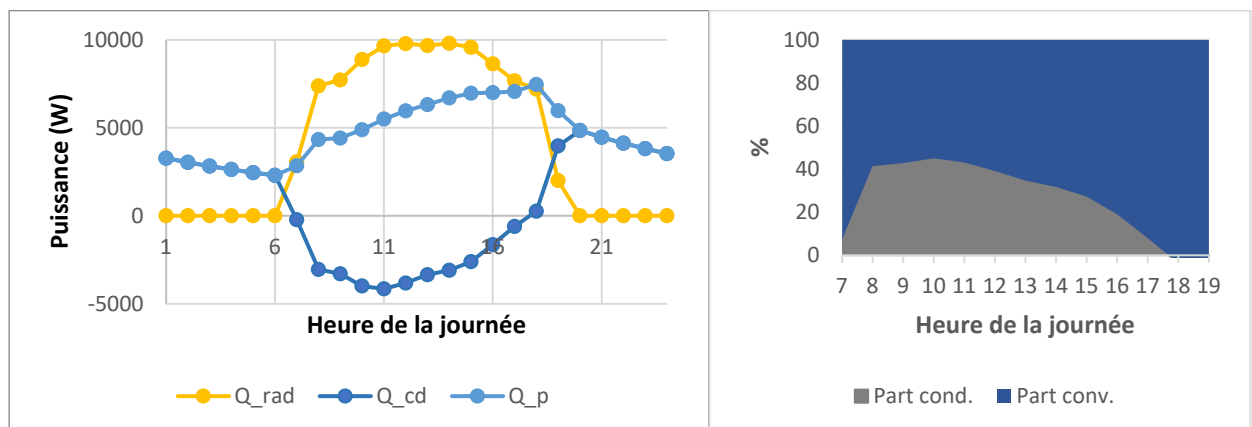


Figure A1.1.c – Exemple d'évolution des différentes puissances du bilan énergétique superficiel d'une paroi.

En conséquence, dans la méthodologie retenue,  $Q_p$  a été estimé dans différentes configurations via la STD, en gardant à l'esprit que les résultats ainsi obtenus sont liés aux choix retenus concernant les compositions des parois et la géométrie de la zone. Toutefois ces choix se veulent représentatifs.

À partir de l'équation A et sachant qu'en évolution forcée les différents flux de la décomposition sont découplés entre eux, il est donc possible de les étudier individuellement et de reconstituer le comportement global d'un bâtiment en les sommant.

Notons que hors évolution forcée, en évolution dite libre -lorsque la température n'est pas maintenue et évolue « librement », les puissances issues de la décomposition (hormis  $Q_{int}$ ) ne sont plus indépendantes car ils modifient la température intérieure et dépendent eux-mêmes de cette température intérieure. Ainsi, l'hypothèse de décomposition comportera des lacunes lorsque les besoins de froid globaux du bâtiment estimés sous cette hypothèse sont faibles car ces périodes pourraient correspondre à des évolutions libres (température inférieure à la température de consigne) grâce au rafraîchissement pouvant être apporté par le renouvellement d'air en début ou fin de journée et aux effets inertiels. Inversement cette hypothèse est d'autant plus valable que les besoins sont importants, ce qui correspond

<sup>14</sup> Il pourrait probablement être envisageable de faire un bilan énergétique journalier, mais cela ne fournirait pas d'indication sur les puissances, ou de relier le pic de transmission du flux solaire et son déphasage en fonction des propriétés thermo-physique de la paroi, mais la généralisation à flux solaire fluctuant quelconque ne serait pas évidente.

aux périodes dimensionnantes qui nous intéressent particulièrement dans le cadre de ce projet. La validité de cette hypothèse est étudiée plus en détail dans la suite.

## 0.2 Découplage des apports internes

Pour vérifier la validité du découplage des apports internes<sup>15</sup>, c'est-à-dire la possibilité de les considérer indépendamment du reste des autres phénomènes énergétiques du bâtiment, les besoins de froid du cas générique ne prenant en compte que les contributions des parois (modèle A) est comparé au même cas auquel on a ajouté des apports internes de 20 W/m<sup>2</sup> (modèle B) :

Lorsque l'on retranche les besoins du modèle B à ceux du modèle A, on obtient un « résidu » qui a l'allure suivant sur les périodes de besoin continu de climatisation, et ce, quels que soit l'orientation de la zone et le type de la paroi (correspondant aux différentes couleurs) :

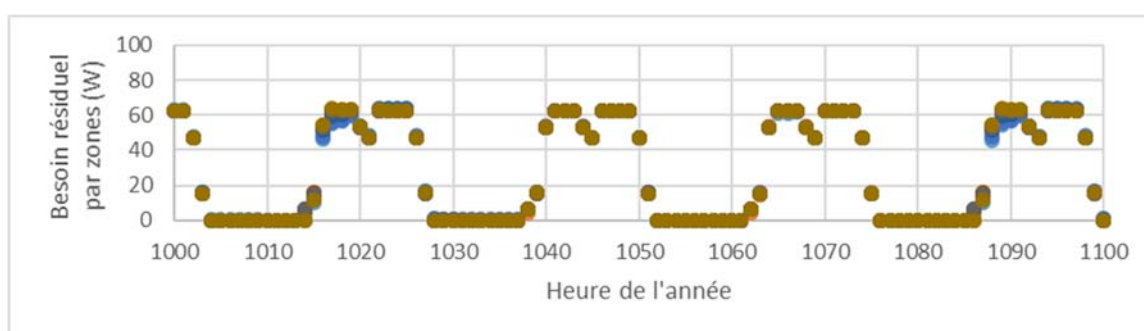


Figure A1.2.a – Besoins résiduels des différentes zones en fonction du temps (période où le découplage des apports internes est valable).

Ce « résidu » correspond aux apports internes modélisés (scénario horaire variable sur la journée). On retrouve donc bien que sur les périodes de climatisation quasi-continues, les besoins dus aux apports internes viennent bien se sommer à ceux dus aux parois.

On observe par ailleurs que ce résultat se dégrade avec l'apparition des périodes d'évolution libre (lorsque la température passe en dessous de la période de consigne), les apports internes impactant celles-ci.

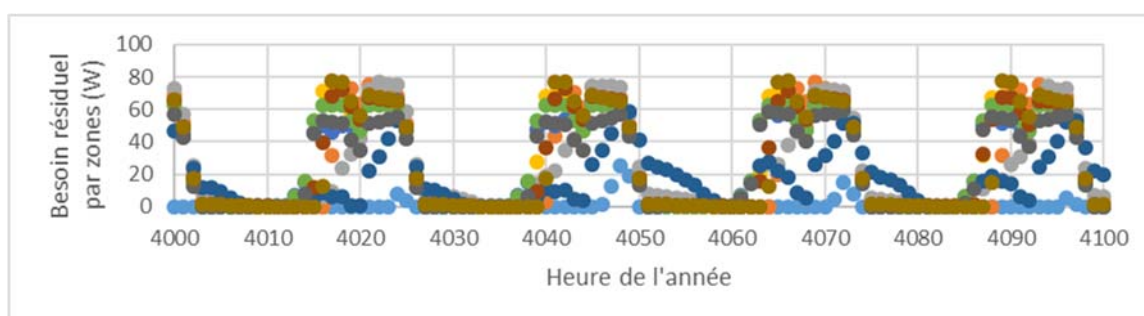


Figure A1.2.b – Besoins résiduels des différentes zones en fonction du temps (période où le découplage n'est pas valable).

<sup>15</sup> On considère que l'intégralité des apports internes est dissipée sous forme convective (hypothèse courante). Une part radiative impliquerait un couplage avec la puissance transmise par les parois.

### 0.3 Découplage du renouvellement d'air

Pour vérifier la validité du découplage du renouvellement d'air, de façon similaire à précédemment, les besoins de froid du cas générique ne prenant en compte que les contributions des parois est comparé au même cas auquel on a ajouté une ventilation de 25 m<sup>3</sup>/h dans chaque zone.

Comme pour les apports internes, sur les périodes de forts besoins de climatisation quels que soit l'orientation et le type de parois, la contribution due à la ventilation vient s'ajouter.

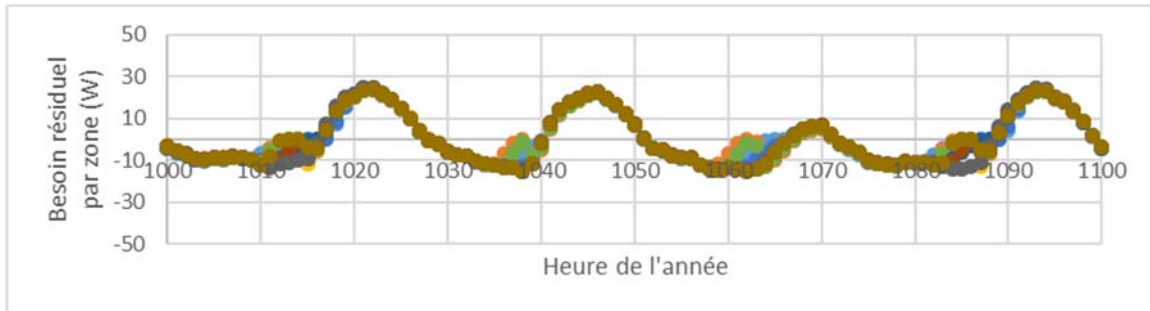


Figure A1.3.a – Besoins résiduels des différentes zones en fonction du temps (période où le découplage du renouvellement d'air est valable).

De même, lors des périodes d'évolutions libres (commençant d'ailleurs à apparaître en fin de nuit ci-dessus), ce découplage n'est plus valable.

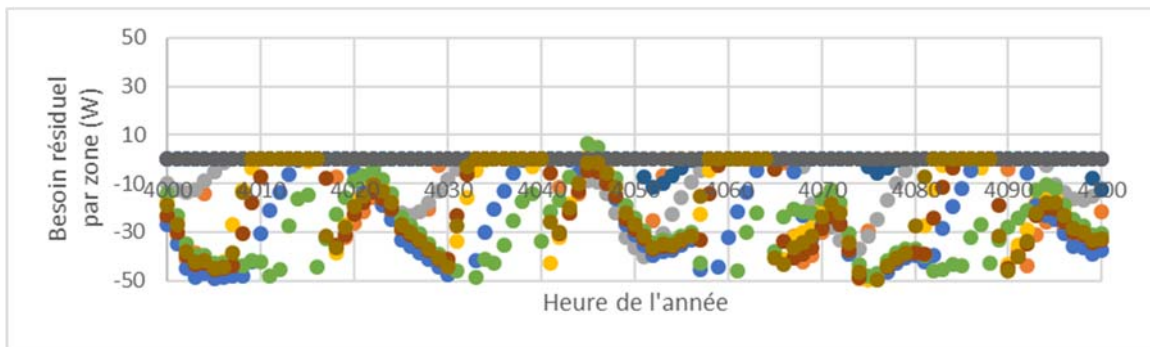


Figure A1.3.b – Besoins résiduels des différentes zones en fonction du temps (période où le découplage du renouvellement d'air n'est pas valable).

### 0.4 Généralisation de la décomposition

Afin de s'assurer que les résultats du cas générique soient généralisables pour des bâtiments quelconques, trois cas ont été étudiés :

- Le cas générique dont les façades nord et sud ont été agrandies d'un facteur 2 ;
- Le cas générique dont les façades est et ouest ont été agrandies d'un facteur 2 ;
- Et un bâtiment fictif quelconque.

Pour chaque cas, les résultats de la STD de ces bâtiments ont été comparés avec les résultats de l'extrapolation du cas générique, consistant en la multiplication des contributions individuelles surfaciques des parois au prorata des surfaces du cas étudié (cf. schéma).



Figure A1.4.a – Représentation de la méthodologie pour la recomposition.

Seuls les résultats du cas du bâtiment fictif sera présenté ici, car il s'éloigne le plus de la configuration du cas générique, d'autant que l'étude des deux autres cas n'apportent pas plus d'éléments.

Le bâtiment fictif dispose de deux étages. Le rez-de-chaussée, en forme de « L » est divisé en 2 zones : une aile Ouest de 200 m<sup>2</sup> exposée principalement Est-Ouest et une aile Est de 200 m<sup>2</sup> exposée Nord-Sud. L'étage de 250 m<sup>2</sup> est à cheval sur ces deux ailes principalement orienté Nord-Sud.

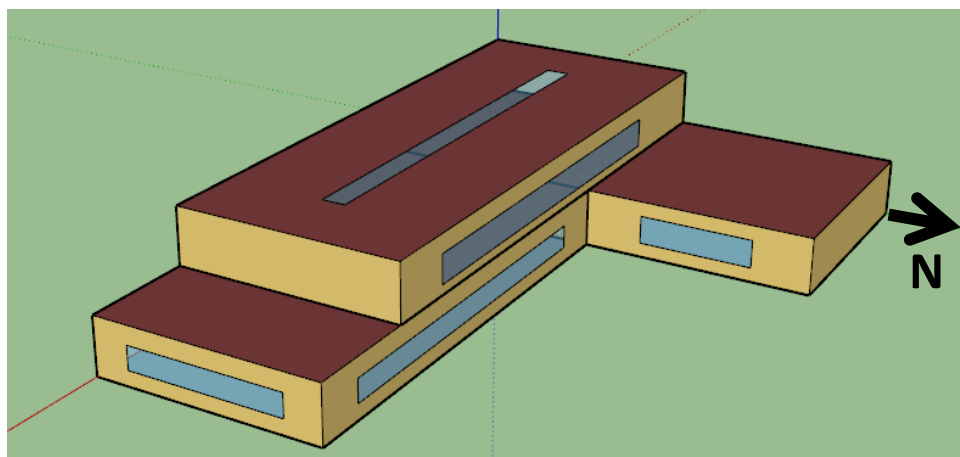


Figure 0.4.b – Maquette 3D du cas d'étude fictif.

La répartition des façades selon leur orientation et leur type est la suivante :

	Aile Est	Aile Ouest	Etage	Total
Nord opaque	34.53	25	41.07	100.6
Sud opaque	50	17.65	62.5	130.15
Est opaque	17.99	18.95	25	61.94
Ouest opaque	0	43.71	25	68.71
Toit opaque	50	100	230.67	380.67
Nord vitrage	15.47	0	21.43	36.9
Sud vitrage	0	7.35	0	7.35
Est vitrage	7.01	6.05	0	13.06
Ouest vitrage	0	6.29	0	6.29
Toit vitrage	0	0	19.33	19.33

Figure 0.4.c – Surface des différents types de parois.

On observe que l'extrapolation permet de reproduire globalement bien le comportement du bâtiment. Toutefois, l'extrapolation a tendance à surestimer les pics journaliers. Ceci pourrait s'expliquer par la présence de masques en fin journée ou de la répartition différente de l'inertie.

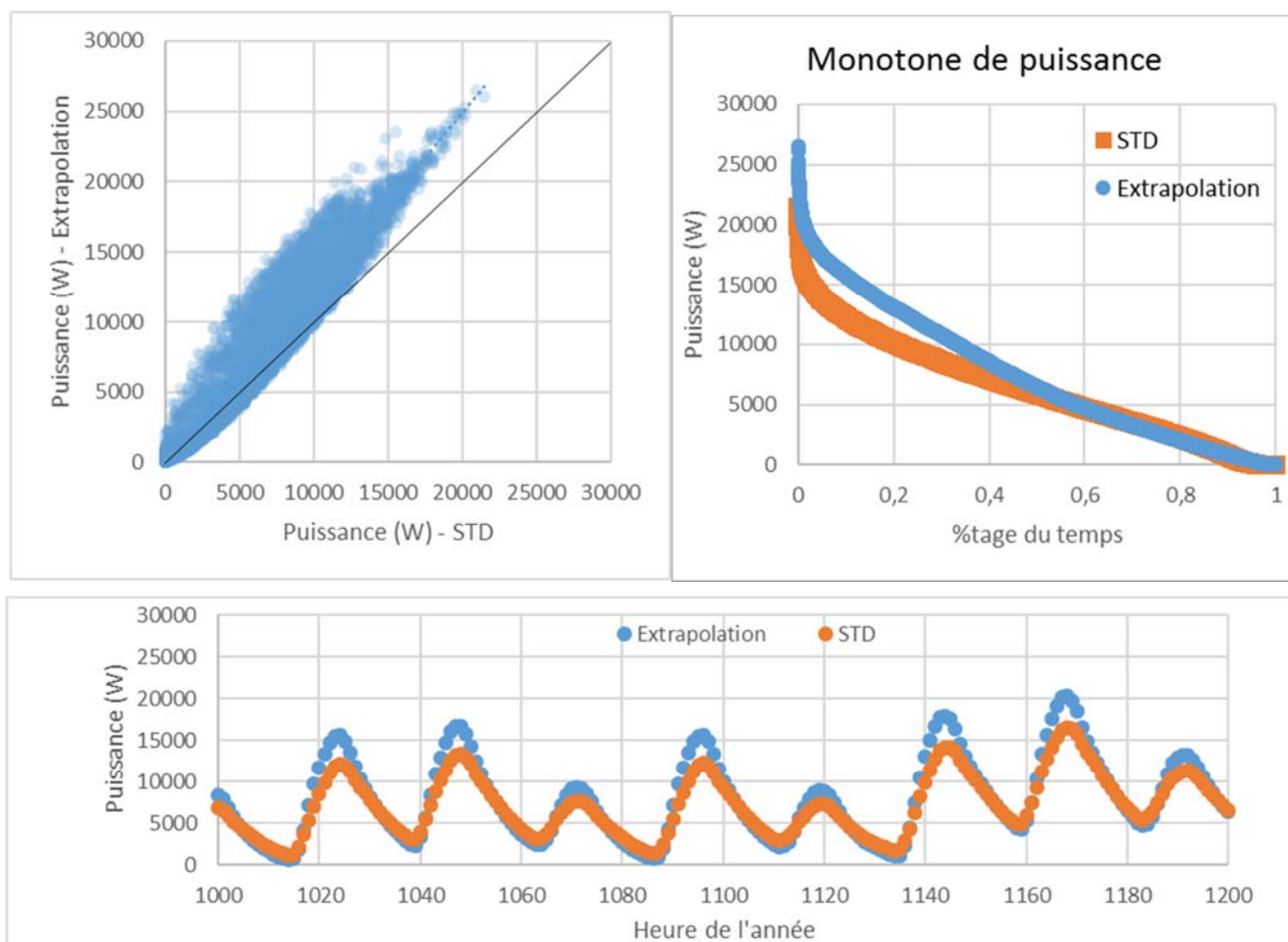


Figure A1.4.d – Comparaison des résultats après recombinaison avec la référence (STD)

On peut toutefois conclure que les contributions individuelles des façades aux besoins sont suffisamment représentatives et donc généralisables. Il est donc pertinent de décomposer l'analyse de sensibilité selon l'orientation des murs et leur type.



## 0 Annexe 2 : Propriétés thermiques des matériaux et des compositions étudiées pour le cas d'étude générique

Parois	Composition	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m/K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique massique (J/kg/K)	Résistance thermique (m <sup>2</sup> K/W)	U (W/m <sup>2</sup> /K)
Extérieure opaque (mur)	Béton	20	1.046	2300	657	0.19 0.36	2.8
Extérieure opaque (toit)	Tôle en acier Lame d'air Béton Lame d'air Dalles acoustiques	0.8 20 2	53 1.046 0.034	7850 2300 200	480 657 710	0 0.22 0.19 0.22 0.58 1.38	0.7
Extérieur vitré	Simple vitrage Facteur solaire : 0.86						5.8
Plafond	Béton Lame d'air Dalles acoustiques	20 2	1.046 0.034	2300 200	657 710	0.19 0.22 0.58 1.16	0.9
Plancher	Sol souple Béton	0.5 20	0.19 1.046	1200 2300	1400 657	0.03 0.19 0.39	2.6
Cloison	Plaque de plâtre Isolant Plaque de plâtre	1.3 2.5 1.3	0.25 0.045 0.25	2800 25 2800	896 920 896	0.05 0.55 0.05 0.65	1.2

# 0 Annexe 3 : Guide à destination de la maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage pour l'utilisation de la simulation thermique dynamique pour la conception de la climatisation à La Réunion

Le présent document a été rédigé dans le cadre du projet Tropiclim. Il s'agit d'une trame de rapport de simulation thermique dynamique dans laquelle sont données des recommandations. Ces recommandations qui suivent s'appuient sur les enseignements tirés d'analyses de sensibilité effectuées dans ce cadre. Conformément à la méthodologie employée, celles-ci sont valables pour des bâtiments tertiaires avec installation de climatisation centralisés de typologie courante situés dans la zone côtière de l'île de la Réunion (zone 1 et 2 au sens de l'outil PERENE).

L'objectif est de proposer un cadre générique de rendu de simulations thermiques dynamiques (STD) balayant un éventail suffisamment large de choix techniques et architecturaux pour une conception optimale de l'installation de climatisation. En complément de cette structure, et au fil de celle-ci, sont fournis des conseils de modélisation et de paramétrisation permettant de faciliter et fiabiliser l'utilisation de la STD par la maîtrise d'œuvre dans ce contexte.

Ce guide n'a pas vocation à présenter les meilleurs choix de conception, mais cherche à cibler les enjeux majeurs de modélisation. Par exemple, l'optimisation du renouvellement d'air n'est pas présentée dans les variantes, car la contribution de celle-ci aux charges thermiques est relativement faible<sup>16</sup>, mais cela n'enlève rien au fait que ce poste devra être étudié avec attention dans le cadre d'une conception performante, dans le sens où celle-ci passe nécessairement par l'optimisation de tous les postes (en commençant évidemment par les plus impactant).

## Plan :

0.1	PRESENTATION GENERALE DU BATIMENT .....	59
0.2	HYPOTHESES DE MODELISATION .....	59
0.2.1	<i>Outil de modélisation/simulation</i> .....	59
0.2.2	<i>Zonage</i> .....	59
0.2.3	<i>Sollicitations</i> .....	60
	Données météorologiques.....	60
	Masques et albédo de l'environnement.....	60
	Apports internes .....	60
0.2.4	<i>Composition du bâtiment</i> .....	61
	Parois opaques.....	61
	Menuiseries .....	62
0.2.5	<i>Régime de fonctionnement</i> .....	63
	Infiltrations .....	63
	Ventilation .....	63
	Climatisation .....	63
0.3	ETUDES PARAMETRIQUES.....	63
0.3.1	<i>Impact de la stratégie de rafraîchissement</i> .....	64
0.3.2	<i>Impact de la température de consigne</i> .....	64
0.3.3	<i>Impact des parois vitrées</i> .....	64
0.3.4	<i>Impact des parois opaques</i> .....	65

<sup>16</sup> Voir 2.3.2. du rendu 1.2.

## 0.1 Présentation générale du bâtiment

### Fiche récapitulative

Nom	...
Maître d'ouvrage	...
Localisation	...
Altitude	...
Zone PERENE	...
Surface utile	...
Surface climatisée	...
Nombre de niveaux	...
Plan de masse	...

En complément des informations du tableau, il est intéressant d'indiquer l'**environnement local immédiat du site** (rural, urbain, front de mer, etc.) et de décrire brièvement le **type de bâtiment** (résidentiel, tertiaire), ses **usages principaux** (enseignement, bureaux, commerces, etc.) et les **orientations des façades principales** du bâtiment.

Le cas échéant, selon la phase du projet, une description du système de refroidissement installé/envisagé est attendu.

Il convient enfin de préciser la surface de référence utilisée pour les calculs ramenés au m<sup>2</sup> (besoins frigorifiques par exemple). On utilisera généralement la surface utile climatisée.

## 0.2 Hypothèses de modélisation

La présente partie vise à décrire et justifier les hypothèses retenues pour l'établissement du modèle.

### 0.2.1 Outil de modélisation/simulation

L'**outil utilisé** doit être précisé, ainsi que le **pas de temps** utilisé pour la simulation dans la méthode de résolution. Pour une bonne restitution de l'évolution temporelle de la puissance, ce dernier doit être à minima horaire.

### 0.2.2 Zonage

Le **zonage thermique** réalisé doit être détaillé en listant sous forme de tableau les différentes zones, leur surface, leur usage type et les orientations principales. Cette description pourra être complétée par

d'autres informations jugées pertinentes (nombre d'occupant, débit de renouvellement d'air, etc.). Il n'est pas nécessaire de mentionner les espaces non-climatisés.

Zones	Surface	Usage	Orientation	Autres caractéristiques
Zone 1	x m <sup>2</sup>	Bureaux	Nord	
...				

Dans la modélisation, il n'est pas indispensable de définir une zone par pièce du bâtiment. Il est pertinent de regrouper en une seule zone les pièces ayant des apports internes et des sollicitations similaires (en termes de niveau et de temporalité). Pour ces dernières on veillera donc à ce que les pièces regroupées aient des façades avec des orientations proches. Une attention particulière doit être portée aux pièces particulièrement défavorisées, à savoir orientée Est ou Ouest, fortement vitrées et/ou à fort apport interne.

### 0.2.3 Sollicitations

#### Données météorologiques

Le **fichier météo** utilisé doit être précisé. Sauf raisons dûment justifiées, il doit correspondre à la zone PERENE définie précédemment. De même, la période simulée doit être annuelle. Il est indispensable que le fichier en question contienne bien des **données d'hygrométrie** sous peine d'estimation faussée de la puissance frigorifique latente.

#### Masques et albédo de l'environnement

Tous les **masques** impactant notablement l'ensoleillement des façades (relief marqué, balcons, casquettes, végétation, etc.) doivent être identifiés et listés. Ils doivent être modélisés avec soin dans la STD.

L'**albédo de l'environnement** a un impact non négligeable sur le flux solaire reçu par les parois, notamment vitrée et donc sur les besoins frigorifiques du bâtiment. Son estimation doit être faite précisément. On considère généralement un albédo de 0,2 pour une surface végétale. Il convient d'être particulièrement vigilant avec la proximité de la mer qui a un fort pouvoir réverbérant. Les autres valeurs peuvent être déduites du tableau fourni en 2.4.1.

Attention, bien qu'ayant un albédo faible, les surfaces minérales sombres ont tendance à accumuler de la chaleur et à créer un micro-climat défavorable qui réémettra cette chaleur en période nocturne, contrairement à une surface végétalisée capable d'apporter de la fraîcheur par évapotranspiration. Les outils de STD peinent généralement à prendre en compte ces aspects. En conséquence, sauf justification, on évitera de paramétrer des albédos de l'environnement inférieur à 0,2, sauf à utiliser des données de températures extérieures prenant en compte cet effet de chaleur urbain ou utilisation de modèles thermiques spécifiques pour l'environnement urbain.

#### Apports internes

Les apports internes affectant directement les besoins frigorifiques, leur estimation précise est indispensable. On distinguera ceux liés aux occupants de ceux liés aux appareils électriques.

On précisera pour chacun, le **niveau de puissance** (sensible et latent) et leur **évolution temporelle** définis selon les plannings courants d'occupation et d'utilisation. L'affectation de ces scénarios aux différentes zones thermiques sera précisée (via la catégorie usage par exemple dans le détail du zonage).

Pour le modèle thermique, la prise en compte des veilles n'est pas nécessaire car elles n'impactent pas notablement le comportement thermique des bâtiments étant donné l'utilisation courante de la coupure nocturne de la climatisation et les taux de renouvellement d'air usuels (infiltrations et ventilation).

Les valeurs peuvent être tirées des ressources indiquées en annexe. Une attention particulière sera portée à la variation des apports liés aux occupants avec la température interne et avec l'activité. Il est conseillé de pondérer ces niveaux par 0,8 pour des individus de sexe féminin et par une valeur comprise entre 0,6 et 0,8 pour des enfants.

#### 0.2.4 Composition du bâtiment

##### Parois opaques

Les différentes **compositions de parois** doivent être présentées suivant le modèle fourni ci-dessous. Il est important de spécifier a minima la résistance thermique totale de la paroi ( $R$  ;  $K.m^2/W$ ) de la composition (hors résistances superficielles) et le **coefficient d'absorption solaire** ( $\alpha$  ; -) afin d'estimer son facteur solaire :

$$S_0 = \frac{0,074 \cdot \alpha}{R + 0,20}$$

Il peut être intéressant de confronter ce dernier avec les recommandations du programme PERENE en intégrant le facteur d'ensoleillement ( $C_m$  ; -) :  $S = C_m \cdot S_0$ .

Parois	Composition de l'extérieur vers l'intérieur	Résistance thermique totale [ $K.m^2/W$ ]	Albédo de la face extérieure [-]	Facteur solaire [-] (hors facteur d'ensoleillement)
Mur extérieur 1	- 20cm de béton - 2 cm de plâtre	0,42	0,4	0,05
...				

Le tableau suivant, issu du programme PERENNE permettant d'estimer les coefficients d'absorption solaires selon les teintes des parois est reproduit ici (source ECODOM) :

Catégorie de teinte	Couleur	Coefficient d'absorption solaire
Claire	Blanc, jaune, beige clair, crème	0,4
Moyenne	Rouge sombre, vert clair, bleu clair	0,6
Sombre	Brun, vert sombre, bleu vif, gris clair, bleu sombre	0,8
Noir	Gris foncé, brun sombre, noir	1

La mention de la capacité calorifique des matériaux n'est pas indispensable, mais doit être paramétrée dans la STD avec des valeurs réalistes. En revanche, la conductivité thermique des différents éléments doit être estimée avec précaution pour une estimation la plus fiable possible de la résistance thermique des parois.

##### Cas particulier d'une lame d'air fortement ventilée

En présence d'une lame d'air fortement ventilée, dans la STD, il existe plusieurs méthodes :

- si l'on dispose d'outils de calcul aéraulique, pour un volume suffisamment important (combles notamment), il est possible de modéliser spécifiquement celui-ci en tant que zone non-climatisée, mais avec de fortes infiltrations (jusqu'à 10 vol/h) ;
- à défaut, il est envisageable de ne pas modéliser directement cette lame d'air et les couches plus externes, mais de considérer que l'air extérieur est directement en contact avec l'élément intérieur adjacent et que cet élément ne reçoit que 30% du flux solaire absorbé par la toiture (coefficient d'absorption solaire multiplié par 0,3).

Dans le cas de lame d'air faiblement ventilé (bardage notamment), il est conseillé de suivre la seconde méthode mais en retenant les valeurs issues du tableau suivant (tiré du livret 2 du programme PREBAT) pour le coefficient d'absorption.

Epaisseur de la lame (cm)	Coefficient d'absorption solaire du bardage	
	0,8	0,4
	Coefficient d'absorption solaire à paramétrer	
5	0,65	0,7
10	0,60	0,65
50	0,55	0,60

Les cas échéants, ces hypothèses de modélisation doivent être spécifiées dans le détail de la composition.

Dans les autres cas, il est nécessaire de modéliser géométriquement tous les masques pouvant impacter notablement une paroi opaque (débord, terrasse, etc.).

#### Cas particulier d'un plancher bas

Concernant les planchers bas, si ceux-ci donnent sur un vide sanitaire il est possible de procéder comme pour les combles, mis-à-part que dans la deuxième variante cette surface ne reçoit pas de flux solaire. Dans le cas d'un contact direct avec le sol, la STD peine généralement à prendre ce contact avec précision étant donné la complexité de l'échange thermique (influence mutuelle, inertie, impact de l'environnement proche, etc.) et de la modélisation du sol. A défaut de modélisation détaillée, il est couramment admis d'utiliser des températures mensuelles moyenne du sol à 50 cm de profondeur<sup>17</sup> comme condition limite, bien que ce cas s'avère plus favorable que la réalité étant donné que le bâtiment aura tendance à réchauffer le sol. Si le contact avec le sol représente un enjeu de modélisation (non-isolé, bâtiment de plain-pied, grande surface par rapport aux autres parois), il peut être intéressant de comparer la modélisation précédente, favorable, avec un cas plus défavorable obtenu en considérant la surface extérieure du sol comme adiabatique (pas d'échange thermique) pour obtenir deux cas extrêmes. Dans tous les cas, il convient de justifier le modèle de contact retenu.

#### Menuiseries

Les différentes caractéristiques des menuiseries doivent être présentées suivant le modèle fourni ci-dessous, en les distinguant par orientation et type de protection. Il est important de spécifier a minima le **facteur solaire** en distinguant sa valeur intrinsèque (du vitrage, hors ombrage) avec celle intégrée au bâti (avec ombrage). Le premier est à estimer précisément à partir des documentations techniques des

<sup>17</sup> Notamment disponible dans les données météorologiques EnergyPlus (.stat)

constructeurs. Il est intéressant de confronter le second avec les recommandations du programme PERENE. Les **protections solaires** peuvent être fixes ou mobiles, intérieures ou extérieures.

Menuiserie	Facteur solaire hors ombrage [-]	Type de protection	Facteur solaire avec ombrage [-]	Coefficient de déperdition U [W/m <sup>2</sup> /K]
Menuiserie 1	0,85	Débord infini, largeur 40 cm	0,35	5
...				

Le coefficient de déperdition des menuiseries n'est pas un paramètre majeur de modélisation. Il peut donc être estimé grossièrement (on pourra retenir 5 W/m<sup>2</sup>/K).

Parmi les caractéristiques supplémentaires des zones, à titre indicatif, il est souhaitable d'indiquer leur pourcentage de vitrage (surface de menuiseries sur surface utile).

### 0.2.5 Régime de fonctionnement

#### Infiltrations

Les bâtiments courants étant relativement peu étanches à l'air, à défaut d'information, on pourra considérer un débit constant d'infiltration de 1 vol/h<sup>18</sup>. Une estimation plus précise selon la qualité de la mise en œuvre est souhaitable.

#### Ventilation

Les débits de renouvellement d'air mécanique doivent être quantifiés par zone selon la présence d'extracteur. A défaut d'information ceux-ci peuvent être estimés à 0,6 vol/h.

#### Climatisation

Le **planning d'utilisation** de la climatisation doit être décrit. Les cas échéants, on veillera à prendre en compte les coupures nocturnes et l'intermittence saisonnière. Il est possible de se restreindre à l'estimation des besoins frigorifiques idéaux. En quel cas, pour une prise en compte réaliste de la puissance frigorifique latente résultante, il faut s'assurer que le modèle intègre une **température de soufflage**. Celle-ci peut être estimée à partir du régime d'eau glacée, mais toutefois, étant donnés les régimes couramment utilisés, une valeur de 10 °C peut être utilisée par défaut.

Une modélisation détaillée des systèmes peut être réalisée pour des études plus approfondies, sans que cela soit indispensable.

Il convient enfin de spécifier la **température de consigne**.

## 0.3 Etudes paramétriques

L'objectif des études paramétriques est de balayer un panel de solutions permettant d'optimiser la conception du bâtiment, mais aussi de mettre en évidence l'importance de certains paramètres. Certaines variantes peuvent être réalisées pour souligner l'importance d'un choix constructif. Les variantes retenues portent sur les paramètres identifiés comme étant les plus impactants.

<sup>18</sup> Le programme PERENE indique 2 à 2,5 vol/h pour les bureaux dans la situation actuelle.

Dans le cadre d'une **conception de systèmes de climatisation**, la sortie sera la **puissance frigorifique totale** (sensible plus latente) **maximale**. Il est conseillé de ne retenir que la **5<sup>ème</sup> plus grande valeur**, les valeurs plus élevées s'avèrent généralement non représentatives. Une attention particulière sera portée aux zones les plus défavorisées. On veillera par ailleurs à exclure les pics simulés ayant lieu lors de la relance matinale du système de climatisation par filtrage des valeurs sur la période de relance. En effet, au pas de temps horaire ces pics sont estimés de façon trop grossière, et sont dus à la relance du système et non directement à la conception du bâtiment. Dans la réalité, ceux-ci peuvent être limités avec une régulation adéquate en anticipant la relance.

Pour un **bilan énergétique**, on s'intéressera à l'**énergie frigorifique totale annuelle** frigorifique (énergie utile) ou électrique (énergie finale) si l'on intègre le coefficient de performance de l'installation.

### **0.3.1 Impact de la stratégie de rafraîchissement**

Avant de concevoir une installation de climatisation, il convient de **justifier l'impossibilité d'avoir recours à de la ventilation naturelle**. A défaut de STD dédiée, ce choix peut être motivé en listant l'ensemble des caractéristiques du bâtiment et de son usage s'y opposant (locaux non-traversants, charges internes trop importantes, conditionnement strict, etc.). Cette analyse peut être menée sur des locaux spécifiques, plus défavorisés en termes de ventilation naturelle, et/ou sur les périodes les plus défavorables.

Les variantes suivantes, en permettant de réduire les charges thermiques, peuvent aider à la conception en ventilation naturelle.

### **0.3.2 Impact de la température de consigne**

La température de consigne a été identifiée comme le paramètre majeur impactant les besoins frigorifiques. Le but de cette variante est de mettre en évidence l'importance de la température de consigne par rapport au respect des objectifs énergétiques, et de mettre en évidence que toute déviation pourra être lourde en conséquence.

La plage de variation de la température peut être de plus ou moins 4°C. Marge pouvant être compensée en termes de confort en ayant recours à un brasseur d'air selon le diagramme de Givoni. Cette analyse permettra au passage de questionner le recours à l'utilisation de brasseur d'air.

### **0.3.3 Impact des parois vitrées**

Les parois vitrées sont logiquement les parois qui contribuent le plus au besoin de froid par transmission du flux solaire. Leur dimensionnement doit être évalué précautionneusement.

- En premier lieu, il convient de mettre en évidence l'influence des protections solaires des vitrages, en comparant les besoins frigorifiques avec et sans. L'impact des protections mobiles intérieure est particulièrement intéressante à prendre en compte en STD dans la mesure où leur efficacité est généralement faible. Pour rappel, les protections fixes extérieures doivent être différenciées par orientation.
- Le facteur solaire des vitrages doit aussi être choisi avec précaution. Les plus performants peuvent descendre à 0,2.
- L'albedo de l'environnement est également important. Pour souligner l'importance de l'environnement immédiat du bâtiment, il est judicieux de comparer l'impact d'un environnement végétal (0,2) avec un environnement urbain réfléchissant (0,6).
- Enfin et surtout, en conception, il est indispensable de tester l'influence du pourcentage de surface vitrée. Sa réduction permet non seulement de réduire le besoin frigorifique, mais aussi de réduire les coûts.



### 0.3.4 Impact des parois opaques

Les parois opaques contribuent principalement au besoin de froid par transmission du flux solaire. Les paramètres affectant le facteur solaire doivent donc être étudiés avec précaution :

- On étudiera aussi l'usage de revêtement plus clair si ce n'est pas déjà le cas : albédo de 0,4 pour les parois opaques et de 0,2 pour les toitures de type Onduline.
- On étudiera l'ajout d'isolant sur les parois les plus exposées à l'ensoleillement en période de climatisation, à savoir la toiture et les façades Est et Ouest. Cet ajout peut engendrer une surchauffe en période nocturne qu'il est généralement possible d'évacuer par renouvellement d'air. On veillera donc à le modéliser correctement le cas échéant.
- On pourra enfin étudier l'ajout d'une structure supplémentaire permettant d'assurer un ombrage quasi-complet pour les parois, de type sur-toiture ventilée ou bardage à lame d'air fortement ventilée (voir conseil de modélisation en 2.4.1).

Les variantes sont données par facilité d'intervention, mais elles peuvent évidemment être étudiées de façon combinées. Les valeurs cible du programme PERENE étant un bon indicateur d'une conception performante.

### 0.3.5 Impact des apports internes

Les apports internes affectant directement les besoins frigorifiques, il convient de tester une variante dite « matériel performant », dans laquelle les appareils utilisés (bureautique et éclairage) sont optimisés en termes de consommation énergétique par rapport une variante « de base » utilisant du matériel non optimisé.

Les résultats de l'analyse de sensibilité menée sur le cas d'étude générique peuvent permettre de faire une première estimation de ces impacts, mais aussi de vérifier la cohérence des résultats obtenus.

## Valeurs indicatives pour les apports internes

### Occupants

Occupants	Référence Enertech		Les guides Bio-Tech, Confort d'été passif (p 29)		Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale – Tome 1: conception des nouveaux bâtiments (p34)			Bilan CARRIER		
	Hiver	Eté	Tint = 19°C	Tint = 25°C	Tint = 29°C	Tint = 25°C	Tint = 26°C	Tint = 27°C	Tint = 24°C	Tint = 26°C
Occupants, part	94	61	94	70	46	67	63	56	71	63

sensible (W/pers.)										
Occupant, part latente (W/pers.)			29	53	77	49	59	60	60	69

### Appareils électriques

Campagne de mesure Enertech				Les guides Bio-Tech, Confort d'été passif (p 31) Source : ASHRAE (Wilkins et Hosni – 2000)				
Cas	Base	Performant	Très performant	Densité	Légère	Moyenne	Moyenne-Lourde	Lourde
Postes informatiques (W/poste)	107	62	25	Ensemble bureautique (W/m <sup>2</sup> )	5,4	10,8	16,1	21,5

PREBAT – livret 4 – Bien climatiser un bâtiment tertiaire (p 12-13)	
Ordinateur de bureau + écran LCD (W/unité)	37
Portable (W/unité)	7
Imprimante (W/unité)	82
Poste équipé d'ordinateur de bureau et écran (W/m <sup>2</sup> )	6
Stations d'accueil pour portables (W/m <sup>2</sup> )	4

### Eclairage

Campagne de mesure Enertech RT2005				Les guides Bio-Tech, Confort d'été passif (p 32) Source : XPAIR (Jean-Pascal Roche)					
	Base	Performant	Très performant		Bureau individuel	Bureau paysager	Salle de réunion	Circulation	Dépôts, archives, sanitaires
Eclairage (W/m <sup>2</sup> )	12	9	6*	Eclairage (W/m <sup>2</sup> )	8	7	9-10	7	5
*Sur les projets les plus performants et engagés, il est possible de descendre jusqu'à 2.									
Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale – Tome 1 : conception des nouveaux bâtiments (p35)							PREBAT – livret 4 – Bien climatiser un bâtiment tertiaire (p 12)		
	Entrepôts, habitat, restaurant, théâtres	Bureau, salle de cours, hall d'entrée avec caisse et guichet	Salle de lecture, d'ordinateur, laboratoire, magasin, hall d'exposition	Supermarché, très grand bureau, amphithéâtre sans fenêtre, travaux de précision					Recommandations
Eclairage (W/m <sup>2</sup> )	8	16	24	45	Eclairage (W/m <sup>2</sup> )				6.7

### Electriques totaux

La puissance électrique consommée a été mesurée par Enertech pour des bâtiments tertiaires réunionnais, dans le cadre du projet SWAC (un tribunal de grande instance, un bâtiment universitaire, un bâtiment administratif, un centre de process et un hôpital). Les résultats sont résumés ici.

Type de zone	Bâtiment	Apport internes électriques (W/m <sup>2</sup> )	
		En occupation	Hors occupation
Bureaux	Bâtiment administratif	15.2	6.9
	Bâtiment administratif	11.8	2.4
	Bâtiment universitaire	3.4	1.8
	Centre de process	12.8	1.8
	Tribunal de Grande Instance	13.1	5.5
Réfectoire	Bâtiment administratif	6.0	2.1
Circulations	Bâtiment administratif	2.8	0.9
	Bâtiment universitaire	1.2	0.2
	Tribunal de Grande Instance	5.3	1.6
Salle d'audience	Tribunal de Grande Instance	18.6	4.6
Hall	Tribunal de Grande Instance	4.0	1.1
Archives	Tribunal de Grande Instance	1.0	0.6
Salle de classe	Bâtiment universitaire	4.9	1.2
Salle informatique	Bâtiment universitaire	148.1	117.7
Local serveur	Bâtiment administratif	340.6	329.7
Local TGTB et onduleurs	Bâtiment administratif	137.5	128.1
Hôpital	Max	11.5	6.7
	Moy.	9.0	5.1
	Min	7.8	3.2

## 0 Annexe 4 : Rapport de modélisation des trois cas d'études


### 0.1 Antenne ouest de la Caisse des Allocations Familiales

0.1.1	Présentation du bâtiment.....	67
	Description globale .....	67
	Instrumentation .....	70
	Outil de modélisation/simulation .....	70
0.1.2	Zonage .....	70
0.1.3	Composition du bâtiment .....	71
	Parois opaques.....	71
	Menuiseries .....	71
	Ponts thermiques.....	71
0.1.4	Sollicitations .....	72
	Données météorologiques.....	72
	Apports internes .....	72
0.1.5	Régime de fonctionnement .....	73
	Ventilation .....	73
	Climatisation .....	73
	Occultations .....	73

#### 0.1.1 Présentation du bâtiment

##### Description globale

<b>Nom</b>	CAF de Saint Paul
<b>Localisation</b>	Savannah, Saint Paul

<b>Zone climatique PERENNE</b>	Zone 1 : Zone littorale sous le vent
<b>Maître d'ouvrage</b>	Caisse Allocations Familiales
<b>Surface climatisée</b>	1217 m <sup>2</sup>
<b>Nombre de niveaux</b>	2, RDC et R+1
<b>Plan de masse</b> (source Géoportail)	

Le bâtiment étudié est situé sur la commune de Saint-Paul, à l'Ouest de l'île de La Réunion, à une altitude de 260 m. Cette localisation correspond à la zone PERENE n°1.

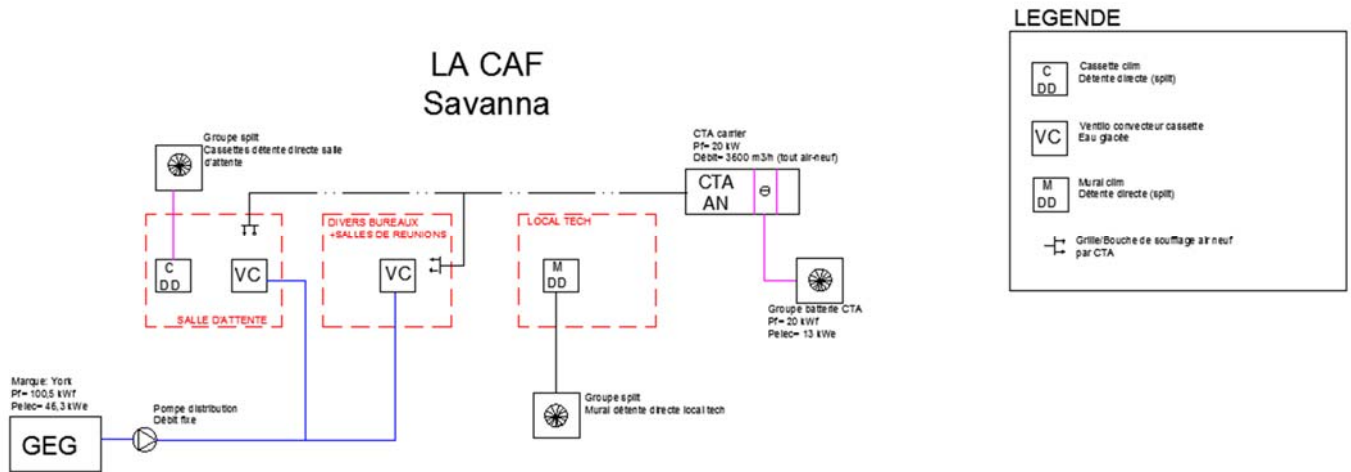
La façade principale de ce bâtiment (entrée) est orientée à 10° vers l'Ouest par rapport au Nord.





Il s'agit d'un bâtiment tertiaire recevant du public. Le rez-de-chaussée est composé d'une part d'une salle d'attente et d'autre part de salles de réunions et de bureaux pour les employés. A l'étage se situent principalement des bureaux, des salles de formation et une salle de restauration.

Pour satisfaire les besoins de froid, le bâtiment est équipé d'un groupe froid alimentant en eau glacée les ventilo-convecteurs répartis dans les différentes salles. Deux splits ont été rajoutés en supplément. Une CTA gère le renouvellement d'air et son conditionnement (rafraîchissement et déshumidification).



Synoptique des systèmes de climatisation

### Instrumentation

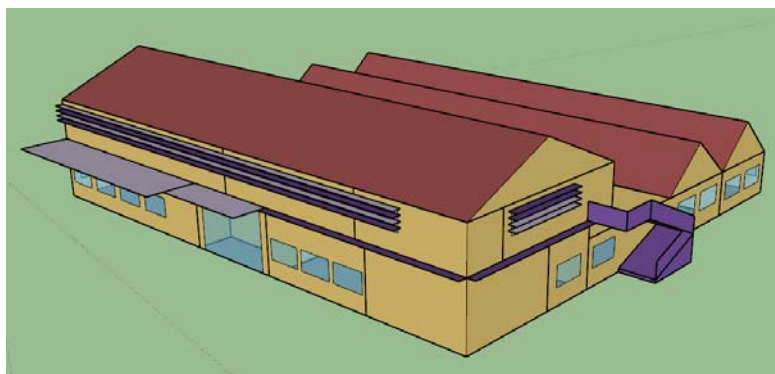
Ce bâtiment a été instrumenté par GreenTech dans le cadre du projet SWACool. Les mesures de frigories du groupe froid alimentant les ventilo-convecteurs ont permis de valider la modélisation.

### Outil de modélisation/simulation

La modélisation et les simulations ont été réalisées avec l’outil EnergyPlus. Conformément aux mesures disponibles lors de l’établissement du modèle, la période simulée porte de mai à décembre 2018.

#### 0.1.2 Zonage

Dans le cadre du projet SWACool, une maquette numérique 3D du bâtiment a été dessinée sous Sketchup par le LEU<sup>19</sup>, conformément aux plans et aux informations recueillis sur site. La maquette a été découpée en différentes pièces conformément à la disposition réelle des salles. Chacune de ces pièces constitue une zone thermique particulière dans le modèle thermique. Ce découpage détaillé permet de considérer les spécificités de chaque pièce, en termes d’orientation et de sollicitation. Les caractéristiques principales et affectations des pièces climatisées sont regroupées dans le tableau en fin de document. Les pièces non climatisées correspondent aux couloirs, aux sanitaires et aux locaux techniques.



Aperçu de la maquette 3D modélisée

<sup>19</sup> Laboratoire d’Ecologie Urbaine, Saint-Pierre, La Réunion

### 0.1.3 Composition du bâtiment

#### Parois opaques

La composition des parois du bâtiment ainsi que les propriétés thermiques des différents éléments retenues sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Parois	Composition	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m/K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique massique (J/kg/K)	Résistance thermique (m <sup>2</sup> K/W)	U (W/m <sup>2</sup> /K)
Extérieure opaque - mur	- Béton	20	1,046	2300	657	0,19 0,36	2,8
Extérieure opaque - toit	- Tôle en acier - lame d'air* - Béton - lame d'air - Dalles acoustiques	0,8 20 2	53 1,046 0,034	7850 2300 200	480 657 710	0 - 0,19 0,22 0,58 1,16	0,7
Plafond	- Béton - lame d'air - Dalles acoustiques	20 2	1,046 0,034	2300 200	657 710	0,19 0,22 0,58 1,16	0,9
Plancher	- Sol souple - Béton	0,5 20	0,19 1,046	1200 2300	1400 657	0,03 0,19 0,39	2,6
Cloison	- Plaque de plâtre - Isolant - Plaque de plâtre	1,3 2,5 1,3	0,25 0,045 0,25	2800 25 2800	896 920 896	0,05 0,55 0,05 0,65	1,2

\* Cette lame d'air est supposée fortement ventilée (combles). Son renouvellement d'air est calculé dynamiquement selon les conditions météorologiques.

Les albédos des parois sont les suivants :

Parois	Albédo
Toit – surface extérieure	0,7
Mur – surface extérieure	0,4
Cloisons et faux-plafonds – surface intérieure	0,4
Sol – surface intérieure	0,7

#### Menuiseries

Les menuiseries du bâtiment sont en simple vitrage en aluminium type coulissant double vantaux avec contrôle solaire. Pour ce type de menuiserie, nous avons retenu un facteur solaire de 0,645 et un coefficient de déperdition de 5,8 W/m<sup>2</sup>/K.

#### Ponts thermiques

Etant donné que les parois extérieures sont fortement déperditives (absence d'isolant pour la plupart) et qu'en climat réunionnais les écarts de température entre intérieur et extérieur sont relativement faibles, les ponts thermiques sont peu importants et peu impactant. En conséquence il a été choisi de ne pas les modéliser.

#### 0.1.4 Sollicitations

##### *Données météorologiques*

Pour valider le modèle, il est nécessaire d'utiliser des données météorologiques réelles mesurées lors de l'instrumentation à proximité du bâtiment étudié. Celles-ci (la température extérieure, l'hygrométrie extérieure, la vitesse du vent, la direction du vent et le flux solaire global horizontal) ont pu être obtenues à partir des données météo France du Port, dont la station se situe à environ 4 km du site.

Il a été nécessaire de convertir les données météorologiques au format compatible avec l'outil de simulation EnergyPlus, à savoir EPW, grâce à l'outil « Weather Statistics and Conversions ».

##### *Apports internes*

###### Liés aux occupants

Conformément à ROULET C-A<sup>20</sup> et au bilan Carrier, les occupants dans une ambiance à 26°C sont supposés dégager 61 W/pers. d'énergie sensible et 69 W/pers. d'énergie latente. Les occupants représentent la seule source interne d'apport latent considérée.

L'occupation a été directement déduite des horaires d'ouverture pour les parties bureaux (6h30-17h du lundi au vendredi), des horaires d'accueil pour la partie accueil (7h-15h du lundi au jeudi, 7h-12h le vendredi). La salle de restauration est supposée occupée de 11h à 13h.

Les nombres de personnes occupant chacune des zones thermiques ainsi que les appareils électriques qui y sont utilisés ont été estimés à partir des détails présents sur les plans, des informations relevés sur site et de l'usage de la zone, et sont récapitulés dans le tableau en fin de document.

###### Liés aux appareils électriques

Les appareils pris en compte sont les ordinateurs, les imprimantes, les serveurs et les écrans. La puissance dissipée par ceux-ci a respectivement été estimée dans un premier temps à 107, 40, 115 et 100 W. Une puissance de 12 W/m<sup>2</sup> est rajouté pour prendre notamment en compte les systèmes d'éclairage.

De la même façon que pour les apports internes liés aux occupants, ceux liés aux appareils électriques sont modulé par l'occupation des différentes parties. On considère une dissipation résiduelle en veille hors occupation de 40% du niveau maximal de ces apports. Celles-ci ont un impact mineur étant donné que le système de climatisation est arrêté en période de fermeture, mis-à-part sur la période de défaillance en fin d'année (voir ensuite).

Les valeurs initiales retenues sont basées sur les résultats des campagnes de mesure menée par Enertech et correspondent à des appareils non-performants.

Pour calibrer le modèles, le niveau des apports sensibles internes ont été réduits de 51% (ce qui indique une surestimation de l'occupation et ou des appareils électriques). Les valeurs finales des apports internes dans les différentes zones sont récapitulées dans le tableau en fin de document.

Notons qu'il a été envisagé de définir les valeurs des apports internes à partir des mesures de la consommation électrique globale du bâtiment, déduite des consommations liées à la climatisation.

---

<sup>20</sup> ROULET C-A, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, collection gérer l'environnement, presses polytechniques et université romandes, 2004, 358 p.



Cependant, cette piste ne s'est pas avérée suffisamment fiable à cause du manque de certaines consommations électriques et à cause de la méconnaissance de la répartition de ces consommations dans les différentes zones.

### 0.1.5 Régime de fonctionnement

#### Ventilation

La ventilation hygiénique et la déshumidification de l'air entrant étant géré par la CTA et sa production de froid n'étant pas mesurée avec les frigories du groupe froid, celle-ci n'est pas modélisée (impact du renouvellement d'air supposé neutre en conséquence).

#### Climatisation

Ne pouvant nous restreindre aux besoins idéaux pour la prise en compte de la puissance latente, le système de climatisation centralisé décrits précédemment (donc hors CTA et splits) ont été modélisé sous EnergyPlus à l'aide des « HVAC Templates ». Conformément aux mesures, la température nominale de l'eau glacée est fixée à 8°C et son écart nominal à 2°C. Le dimensionnement automatique réalisé par EnergyPlus a été surdimensionnée d'un facteur 10 afin d'éviter toute saturation de la puissance délivrée.

La climatisation fonctionne de façon intermittente sur les journées d'ouverture, de 6h30 à 18h. Notons toutefois que sur la période d'instrumentation, suite à un dysfonctionnement, la climatisation a fonctionné en permanence à partir du 12 décembre 2018.

La consigne de température est supposée être égale à 26°C

#### Occultations

Aucune occultation mobile interne ou externe n'a été modélisé. Seules les occultations extérieures fixes, issues du modèle géométrique, sont prises en compte.

Au rez-de-chaussée, seule la façade principale (Nord-Ouest) comporte des casquettes. A l'étage, les façade Nord-Ouest et Sud-Ouest comportent des protections solaires avec lames horizontales.

Niveau	Pièce/Zone thermiques	Partie	Surface	Nombre d'occupants	Nombre d'ordinateur/ serveur/ imprimante/ écran				Apports internes sensibles totaux (W/m²)
Etage	Bureaux étages	Administrative	174	12	12	0	6	0	16
	Salle informatique	Administrative	27	0	0	1	0	0	3
	Salle CE - Syndicats	Administrative	26	1	0	0	0	0	9
	Salle de réunion/formation	Accueil du public	42	24	1	0	0	0	31
	Salle de restauration	Restauration	60	72	0	0	0	0	53
Rez-de-chaussée	Bureau cadre-logistique	Administrative	45	4	2	0	2	0	15
	Espaces multi-services & accueil	Accueil du public	299	20	17	0	2	3	15
	Bureaux nord	Administrative	98	5	5	0	5	0	14
	Bureaux centre	Administrative	33	3	2	0	2	0	16

	Bureaux open-space	Administrative	328	37	37	0	3	0	20
	Bureau vérification	Administrative	31	3	1	0	1	0	14
	Bureau cadre proximité	Administrative	14	1	1	0	1	0	16
	Bureaux sud	Administrative	39	6	3	0	3	0	21
	Total surface climatisée		1217						


*Caractéristiques des zones thermiques climatisées.*

## 0.2 Aile de la faculté de lettres de l'université de La Réunion

0.2.1	Présentation du bâtiment.....	75
	Description globale .....	75
	Instrumentation .....	76
	Outil de modélisation/simulation .....	76
0.2.2	Zonage .....	77
0.2.3	Composition du bâtiment .....	77
	Parois opaques.....	77
	Menuiseries .....	78
	Ponts thermiques.....	78
0.2.4	Sollicitations .....	78
	Données météorologiques.....	78
	Apports internes .....	78
0.2.5	Régime de fonctionnement .....	79
	Ventilation .....	79
	Climatisation .....	80
	Occultations.....	80

### 0.2.1 Présentation du bâtiment

#### Description globale

<b>Nom</b>	L1 de la Fac de Lettres
<b>Localisation</b>	Université du Moufia, Saint-Denis
<b>Zone climatique PERENNE</b>	Zone 2 : Zone littorale au vent
<b>Maître d'ouvrage</b>	Université de La Réunion
<b>Surface climatisée</b>	1756 m <sup>2</sup>
<b>Nombre de niveaux</b>	6, du R-1 au R+5
<b>Plan de masse</b> (source Géoportail)	

Le bâtiment étudié se situe sur le campus de l'Université de La Réunion à Sainte-Clothilde, commune limitrophe de Saint-Denis. Le site se situe au Nord de l'île, à une altitude de 100 m, ce qui correspond à la zone PERENE n°2.



Ce bâtiment est à usage d'enseignement. Seule l'aile Sud est étudiée. Elle s'étend suivant un axe sensiblement Est-Ouest. Elle est composée de deux amphithéâtres au rez-de-chaussée et de salles de cours réparties sur les 4 étages. Parmi les salles de cours, certaines sont des salles informatiques et audiovisuelles (voir détaille dans le tableau en fin de document).

Pour satisfaire les besoins de froid, le bâtiment est équipé de deux groupes froids. L'un alimente, via une boucle d'eau glacée, les batteries froides des deux centrales de traitement de l'air (CTA) assurant respectivement le conditionnement de l'air des deux amphithéâtres. Le second alimente, toujours via une boucle d'eau glacée les ventilo-convecteurs réparties dans les salles de cours.

### *Instrumentation*

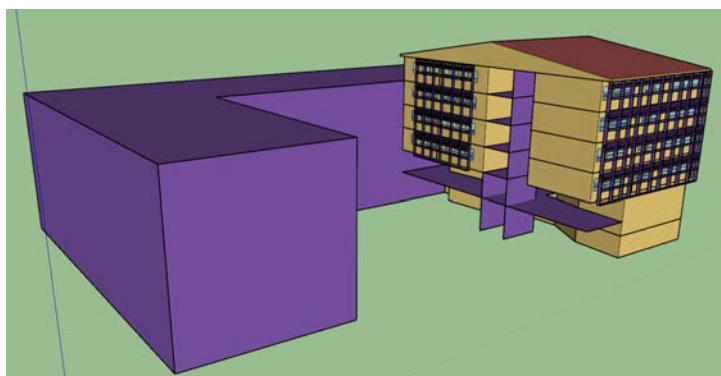
Ce bâtiment a été instrumenté par GreenTech dans le cadre du projet SWACool. Les mesures de frigories des deux groupes froids ont permis de valider la modélisation.

### *Outil de modélisation/simulation*

La modélisation et les simulations ont été réalisées avec l'outil EnergyPlus. Les mesures disponibles couvrant une année complète, la période de simulation a été définie de début janvier à fin décembre, en utilisant les données de 2019 de janvier à mars et de 2018 d'avril à décembre.

## 0.2.2 Zonage

Dans le cadre du projet SWACool, une maquette numérique 3D du bâtiment a été dessinée sous Sketchup par le LEU<sup>21</sup>, conformément aux plans et aux informations recueillis sur site. La maquette a été découpée en différentes pièces conformément à la disposition réelle des salles. Chacune de ces pièces constitue une zone thermique particulière dans le modèle thermique. Ce découpage détaillé permet de considérer les spécificités de chaque pièce, en termes d'orientation et de sollicitation. Les caractéristiques principales et affectations des pièces climatisées sont regroupées dans le tableau en fin de document. Les pièces non climatisées correspondent aux couloirs et aux sanitaires.



Aperçu de la maquette 3D modélisée

## 0.2.3 Composition du bâtiment

### Parois opaques

La composition des parois du bâtiment ainsi que les propriétés thermiques des différents éléments retenues sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Parois	Composition	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m/K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique massique (J/kg/K)	Résistance thermique (m <sup>2</sup> K/W)	U (W/m <sup>2</sup> /K)
Extérieure opaque - mur	- Béton	20	1,046	2300	657	0,19 0,36	2,8
Extérieure opaque - toit	- Tôle en acier - lame d'air - Béton - lame d'air - Dalles acoustiques	0,8 20 2	53 1,046 0,034	7850 2300 200	480 657 710	0 0,22 0,19 0,22 0,58 1,38	0,7
Plafond	- Béton - lame d'air - Dalles acoustiques	20 2	1,046 0,034	2300 200	657 710	0,19 0,22 0,58 1,16	0,9
Plancher	- Sol souple - Béton	0,5 20	0,19 1,046	1200 2300	1400 657	0,03 0,19	

<sup>21</sup> Laboratoire d'Ecologie Urbaine, Saint-Pierre, La Réunion

						0,39	2,6
Cloison	- Plaque de plâtre	1,3	0,25	2800	896	0,05	
	- Isolant	2,5	0,045	25	920	0,55	
	- Plaque de plâtre	1,3	0,25	2800	896	0,05	
						0,65	1,2

Les albédos des parois sont les suivants :

Parois	Albédo
Toit – surface extérieure	0,7
Mur – surface extérieure	0,4
Cloisons et faux-plafonds – surface intérieure	0,4
Sol – surface intérieure	0,7

### *Menuiseries*

Les menuiseries du bâtiment sont en simple vitrage aluminium. Pour ce type de menuiserie, nous avons retenu un facteur solaire de 0,86 et un coefficient de déperdition de 5,8 W/m<sup>2</sup>/K.

### *Ponts thermiques*

Etant donné que les parois extérieures sont fortement déperditives (absence d'isolant pour la plupart) et qu'en climat réunionnais les écarts de température entre intérieur et extérieur sont relativement faibles, les ponts thermiques sont peu importants et peu impactants. En conséquence il a été choisi de ne pas les modéliser.

## **0.2.4 Sollicitations**

### *Données météorologiques*

Pour valider le modèle, il est nécessaire d'utiliser des données météorologiques réelles mesurées lors de l'instrumentation à proximité du bâtiment étudié. Celles-ci (la température extérieure, l'hygrométrie extérieure, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, la direction du vent et le flux solaire global horizontal) ont pu être obtenues à partir d'une station présente sur le campus universitaire.

Il a été nécessaire de convertir les données météorologiques au format compatible avec l'outil de simulation EnergyPlus, à savoir EPW, grâce à l'outil « Weather Statistics and Conversions ».

### *Apports internes*

#### Liés aux occupants

Conformément à ROULET C-A<sup>22</sup> et au bilan Carrier, les occupants dans une ambiance à 26°C sont supposés dégager 61 W/pers. d'énergie sensible et 69 W/pers. d'énergie latente. Les occupants représentent la seule source interne d'apport latent considérée.

Afin de définir les évolutions de l'occupation des différentes salles, nous disposons des plannings d'occupation des salles sur la période d'instrumentation. Ceux-ci nous permettant seulement de savoir si une salle est occupée ou non à un moment donné, le nombre d'occupant est supposé égale à 80% de la

<sup>22</sup> ROULET C-A, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, collection gérer l'environnement, presses polytechniques et université romandes, 2004, 358 p.

capacité des salles. Les capacités de certaines salles sont connues grâce au plan (toutes les salles informatiques et audiovisuelle, les deux amphithéâtres et 3 salles de cours). Les autres (les 10 salles de cours restantes) ont été déduites suivant le ratio de place au mètre carré moyen calculé à partir des données précédentes pour le même type de salle (0,7 places/m<sup>2</sup>). Les capacités des différentes salles sont récapitulées dans le tableau en fin de document.

#### Liés aux appareils électriques

Les seuls équipements électriques pris en compte spécifiquement sont les ordinateurs. On les estime à une unité par salle audiovisuelle et amphithéâtre, et à 10 unités pour les salles informatiques. Les apports internes dissipés par ceux-ci sont estimés à 107 W/unité.

Pour les autres apports internes, dont ceux liés aux systèmes d'éclairage, on les estime dans un premier temps à 12 W/m<sup>2</sup>. Après calibration (voir partie X), cette valeur est ramenée à 24 W/m<sup>2</sup>, ce qui indique une sous-estimation initiale des apports internes.

Les valeurs initiales retenues sont basées sur les résultats des campagnes de mesure menée par Enertech et correspondent à des appareils non-performants.

De la même façon que pour les apports internes liés aux occupants, ceux liés aux appareils électriques sont modulés par l'occupation respective des différentes pièces. On ne considère donc pas de dissipations résiduelles en veille hors occupation. Ce choix étant justifié par la coupure nocturne du système de refroidissement et l'impact mineur des veilles sur les besoins maximaux de froid et donc le dimensionnement des systèmes. La valeur des apports internes dans les différentes pièces sont récapitulées dans le tableau en fin de document.

Notons qu'il a été envisagé d'ajuster les apports internes à partir des mesures de consommation électrique. Nous disposons en effet de la consommation électrique totale du bâtiment via le gestionnaire et des consommations électriques liées à la climatisation. Cependant la consommation totale électrique du bâtiment concerne toutes les ailes du bâtiment et pas seulement celle étudiée. Une décomposition au prorata des surfaces ne s'avère pas suffisamment fiable : on se retrouve avec une consommation électrique liée à la climatisation supérieure à la consommation totale. A défaut d'information plus précise pour décomposer cette consommation totale du bâtiment, cette piste n'a donc pas été poursuivie.

#### **0.2.5 Régime de fonctionnement**

##### *Ventilation*

Le renouvellement d'air hygiénique des amphithéâtres est géré respectivement par les deux CTA qui leur sont affectées. A défaut d'information ceux-ci ont été estimés à 30 m<sup>3</sup>/h/pers. Les CTA fonctionnent uniquement en cas d'occupation.

Dans les autres salles, les entrées d'air pour le renouvellement hygiénique sont disposées au niveau des menuiseries. D'après les plans, chaque salle dispose de bouches d'extractions, dont le nombre et les débits associés sont indiqués pour la plupart. Les quelques informations manquantes sont déduites de façon cohérente aux caractéristiques des autres salles. Les extracteurs fonctionnent lors de l'ouverture du bâtiment : entre 7h30 et 20h10 du lundi au vendredi et entre 7h30 et 13h le samedi, hors jours fériés et fermeture en vacances scolaires.

Les débits de renouvellement d'air des différentes pièces sont récapitulés dans le tableau en fin de document.

Notons que les bouches d'extractions présentes sur les plans n'ont pas pu être identifiées sur site. Elles ont toutefois tout de même été modélisées conformément aux plans. Cette hypothèse est confortée par la présence et le fonctionnement confirmé par l'instrumentation d'un extracteur différent de celui gérant les sanitaires (possible aspiration dans les faux-plafonds dû à un gainage non finalisé).

## Climatisation

Ne pouvant nous restreindre aux besoins idéaux pour la prise en compte de la puissance latente, les systèmes de climatisation décrits précédemment (ventilo-convecteur, boucle d'eau glacée et groupe froid) ont été modélisés sous EnergyPlus à l'aide des « HVAC Templates ». Conformément aux mesures, la température nominale de l'eau glacée est fixée à 10°C et son écart nominal à 1°C. Le dimensionnement automatique réalisé par EnergyPlus a été surdimensionné d'un facteur 10 afin d'éviter toute saturation de la puissance délivrée.

La climatisation fonctionne de façon intermittente sur les journées et en fonction des saisons. En période estivale, la climatisation est mise en marche de la même façon que la ventilation : lors de l'occupation pour les amphithéâtres et lors de l'ouverture du bâtiment pour les salles. En période hivernale, la climatisation est complètement arrêtée. Sur la période considérée, la coupure a eu lieu du 19 juin au 22 août (exceptionnellement plus tôt cette année).

Conformément à la programmation de l'installation, la température de consigne a été fixée à 26°C dans les salles de cours et à 25°C dans les amphithéâtres.

Pour une meilleure fiabilité des résultats, les périodes de fonctionnement précises ont été calées conformément aux résultats de mesures (fonctionnement effectif ou non des groupes froids).

## Occultations

Aucune occultation mobile interne ou externe n'a été modélisée. Seules les occultations extérieures fixes, issues du modèle géométrique, sont prises en compte.

Du R-1 au R+1 des casquettes en béton protègent les amphithéâtres. Le R+1 comporte des brise-soleils extérieurs avec lame aluminium réglages. Les étages allant du R+2 au R+5 comportent des brise-soleils fixes en béton déportés avec lames aluminium inclinées. L'autre aile de la faculté crée un masque.

Niveau	Pièce/Zone thermiques	Surface	Renouvellement d'air neuf (m <sup>3</sup> /h)	Capacité (place)	Puissance interne installée dû aux appareils électrique (W/m <sup>2</sup> )
1	Amphi 4	121	3120	104	25
	Amphi 5	117	3120	104	25
2	Salle 24	42	540	30	24
	Salle 25	45	500	30	24
	Salle 26	44	540	30	24
	Salle 27	56	750	40	24
	Salle 28	55	540	40	24
	Salle 29A	57	750	40	24
	Salle 29B	70	900	50	24
3	Salle 21 – Salle de cours 36	45	250	30	24
	Salle 20 – Salle de cours 37	56	300	40	24
	Salle 14 - Informatique	48	250	10	46
	Salle 15 – Audiovisuel	44	250	10	48
	Salle 16 – Informatique 1	49	250	10	46
	Salle 19 – Informatique 2	50	250	10	45



	Salle 18 – Informatique 3	44	250	<i>10</i>	<i>48</i>
	Salle 17 – Informatique 4	50	210	<i>10</i>	<i>46</i>
4	Salle 45	125	<i>1000</i>	<i>60</i>	<i>24</i>
	Salle 44 – Audiovisuelle 2	115	750	<i>40</i>	<i>25</i>
	Salle 46 – Audiovisuelle 1	146	750	<i>40</i>	<i>25</i>
5	Salle 5 – Salle de cours 51	47	<i>540</i>	<i>30</i>	<i>24</i>
	Salle 4 – Salle de cours 53	58	<i>750</i>	<i>40</i>	<i>24</i>
	Salle 2 – Salle de cours 52	125	<i>1500</i>	<i>90</i>	<i>24</i>
	Salle 3 – Salle de cours 54	146	<i>1620</i>	<i>100</i>	<i>24</i>
	Total surface climatisée	1755			


*Caractéristiques des zones thermiques climatisées (valeurs estimées en italique)*

## 0.3 Entrepôt pharmaceutique de Saint-Gilles les Bains

0.3.1	Présentation du bâtiment.....	82
	Description globale .....	82
	Instrumentation .....	83
	Outil de modélisation/simulation .....	83
0.3.2	Zonage .....	83
0.3.3	Composition du bâtiment .....	84
	Parois opaques.....	84
	Menuiseries .....	85
	Ponts thermiques.....	85
0.3.4	Sollicitations .....	85
	Données météorologiques.....	85
	Apports internes .....	85
0.3.5	Régime de fonctionnement .....	85
	Ventilation .....	85
	Climatisation .....	85
	Occultations .....	86

### 0.3.1 Présentation du bâtiment

#### Description globale

<b>Nom</b>	Entrepôt pharmaceutique de l'AURAR au mont Roquefeuil
<b>Localisation</b>	Saint-Gilles les bains
<b>Zone climatique PERENNE</b>	Zone 1 : Zone littorale sous le vent
<b>Maître d'ouvrage</b>	SCI Rose des sables
<b>Surface climatisée</b>	562 m <sup>2</sup>
<b>Nombre de niveaux</b>	1
<b>Plan de masse (source Géoportail)</b>	

Le bâtiment étudié est situé sur la commune de Saint-Gilles les bains. Le site se situe à l'Ouest de l'île, à une altitude de 50 m, ce qui correspond à la zone PERENE n°1. Il s'étend du Sud-Ouest au Nord-Est suivant un axe orienté à 35° vers l'Est par rapport au Nord.

Ce bâtiment tertiaire est dévolu au stockage de produits pharmaceutique. La zone de stockage est d'un seul tenant sur 562 m<sup>2</sup> contenant de nombreux rayonnages. Deux pièces sont aménagées à l'intérieur pour les besoins des employés.

Pour la conservation des produits pharmaceutiques, la zone de stockage doit être maintenue à une température maximale de 28°C. Pour cela, cette zone est équipée d'un groupe froid solaire à adsorption

(12 kWf), complété d'un groupe froid électrique (30 kWf) en appoint. Les émetteurs sont des ventilo-convecteurs. Le conditionnement des deux autres pièces n'est pas étudié.



### *Instrumentation*

Ce bâtiment a été instrumenté par GreenTech dans le cadre de la 2<sup>ème</sup> tâche du présent projet. Les mesures de frigorifiques totales des deux groupes froids (solaire et électrique) ont permis de valider la modélisation.

### *Outil de modélisation/simulation*

La modélisation et les simulations ont été réalisées avec l'outil DesignBuilder utilisant le moteur de calcul EnergyPlus, afin de profiter de l'interface de modélisation spécifique pour les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC). Les mesures disponibles couvrant une demi année, la période de simulation a été définie de début janvier à fin juin, en utilisant les données de 2019. Les mesures de frigorifiques comportent deux coupures : la première du 29 janvier au 22 février et la seconde du 17 avril au 14 mai. Lors de la comparaison, les résultats de simulation ont logiquement été tronqués en conséquence.

### *0.3.2 Zonage*

La maquette numérique 3D du bâtiment a été dessinée avec le modelleur de DesignBuilder, conformément aux plans et aux informations recueillis sur site. La maquette comporte trois zones : le hangar de stockage et les deux pièces.

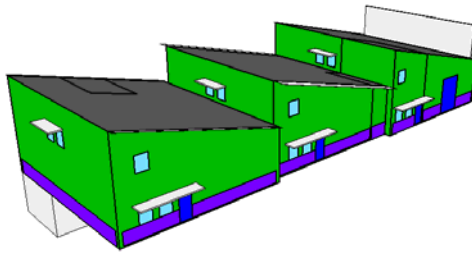


Figure 3. Aperçu de la maquette 3D modélisée

### 0.3.3 Composition du bâtiment

#### Parois opaques

La composition des parois du bâtiment ainsi que les propriétés thermiques des différents éléments retenus sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Parois	Composition	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m/K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique massique (J/kg/K)	Résistance thermique (m <sup>2</sup> K/W)	U (W/m <sup>2</sup> /K)
Extérieure opaque - mur courant	- Bardage acier	0,1	50	7800	450	0,00	
	- Isolant	8	0,0408	15	1300	1,96	
	- Plaque de plâtre	1,3	0,25	900	1000	0,05	
						2,18	0,46
Extérieure opaque - soubassement	- Parpaing	20	0,51	1400	1000	0,39	
						0,56	1,78
Extérieure opaque - toit	- Tôle en acier	0,1	50	7800	450	0,00	
	- Isolant	8	0,0408	15	1300	1,96	
	- Lamé d'air					0,23	
	- Dalles acoustiques	5	0,06	300	1000	0,83	
						3,19	0,31
Plancher	- Chappe	7	1,13	2000	1000	0,06	
	- Béton	10	0,41	1200	840	0,24	
						0,48	2,10
Cloison	- Plaque de plâtre	2,5	0,25	2800	896	0,10	
	- Lamé d'air					0,15	
	- Plaque de plâtre	2,5	0,25	2800	896	0,10	
						0,52	1,92

Les albédos des parois sont les suivants :

Parois	Albédo
Toit – surface extérieure	0,3
Mur – surface extérieure	0,3
Cloisons – surface intérieure	0,5
Faux-plafonds – surface intérieure	0,6
Sol – surface intérieure	0,73

### *Menuiseries*

Les menuiseries du bâtiment sont en simple vitrage avec film opacifiant. Pour ce type de menuiserie, nous avons retenu un facteur solaire de 0,35 et un coefficient de déperdition de 4,6 W/m<sup>2</sup>/K.

### *Ponts thermiques*

Etant donné que les parois extérieures sont fortement déperditives (absence d'isolant pour la plupart) et qu'en climat réunionnais les écarts de température entre intérieur et extérieur sont relativement faibles, les ponts thermiques sont peu importants et peu impactants. En conséquence il a été choisi de ne pas les modéliser.

#### **0.3.4 Sollicitations**

##### *Données météorologiques*

Pour valider le modèle, il est nécessaire d'utiliser des données météorologiques réelles mesurées lors de l'instrumentation à proximité du bâtiment étudié. Celles-ci (la température extérieure, l'hygrométrie extérieure, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, la direction du vent et le flux solaire global horizontal) ont pu être obtenues à partir d'une station associée à l'instrumentation du groupe froid.

Il a été nécessaire de convertir les données météorologiques au format compatible avec l'outil de simulation EnergyPlus, à savoir EPW, grâce à l'outil « Weather Statistics and Conversions ».

##### *Apports internes*

###### Liés aux occupants

Le hangar est supposé occupé par deux personnes en permanence lors des horaires d'ouverture (de 7h à 17h). Ces deux personnes, effectuant un travail physique (manutention) sont supposées dégager 400 W chacune (conformément aux données du CISBE).

###### Liés aux appareils électriques

Pour les autres apports internes, dont ceux liés aux systèmes d'éclairage, on les estime à 10 W/m<sup>2</sup>.

De la même façon que pour les apports internes liés aux occupants, ces apports ont lieu uniquement sur les horaires d'ouverture. On ne considère donc pas de dissipations résiduelles en veille hors occupation. Ce choix étant justifié par l'impact mineur de celles-ci sur les besoins maximaux de froid et donc le dimensionnement des systèmes.

#### **0.3.5 Régime de fonctionnement**

##### *Ventilation*

Le bâtiment ne comporte pas de ventilation mécanique. Le renouvellement d'air est assuré par les infiltrations résiduelles. Un renouvellement d'air non négligeable a aussi lieu lors des manœuvres de stockage/déstockage. A défaut d'information, le débit nominal d'infiltration a été fixé à 1 vol/h.

##### *Climatisation*

Ne pouvant nous restreindre aux besoins idéaux pour la prise en compte de la puissance latente, les systèmes de climatisation décrits précédemment (ventilo-convecteur, boucle d'eau glacée et groupe froid) ont été modélisés avec le module CVC détaillé de DesignBuilder. Conformément aux caractéristiques des systèmes utilisés, le régime de température de l'eau glacée est 7/12 °C. Le dimensionnement automatique réalisé par EnergyPlus a été surdimensionné d'un facteur 1,5 afin d'éviter toute saturation de la puissance délivrée.

La climatisation fonctionne de façon intermittente sur les journées, de 6h à 19h, mais pendant toute l'année.

La température de consigne a été fixée à 25°C conformément aux informations collectées sur site.

### *Occultations*

Aucune occultation mobile interne ou externe n'a été modélisé. Seules les occultations extérieures fixes, issues du modèle géométrique, sont prises en compte. Des casquettes sont placées au-dessus des fenêtres basses de la façade Sud-Est et des fenêtres hautes orientées Sud-Ouest.

## 0 Annexe 5 : Comparaisons des modèles validés avec les mesures

Suite à l'étape de calibration, les écarts<sup>23</sup> entre modèle et mesures, suivant différents indicateurs, sont donnés dans les tableaux qui suivent.

### 0.1 Antenne ouest de la caisse des allocations familiales

	Mesures	Simulation	Ecart relatif / mesures (%)
Besoin/Conso, Annuelle (kWh/m <sup>2</sup> /an) [estim,]	55,8	55,1	-1
Besoin/Conso, Mensuelle (kWh/m <sup>2</sup> /an)			
Mai	3,4	2,6	-23
Juin	4,8	3,7	-23
Juillet	3,8	2,7	-27
Aout	1,9	2,7	40
Septembre	1,9	2,7	39
Octobre	3,7	4,1	10
Novembre	4,9	5,1	4
Décembre	11,7	10,2	-12
Maximum (W/m <sup>2</sup> )	39,6	52,0	31
Monotone de puissance (W/m <sup>2</sup> ) [estim,]			
à 5 %	31,1	29,1	-10
à 10 %	25,3	22,9	-10
à 20 %	17,4	16,9	-7
à 30 %	11,6	10,5	-11
à 50 %	0,0	0,0	-95
<i>Puissance installée (W/m<sup>2</sup>)</i>	<i>80</i>		
Coefficients de corrélation (-)			
Puissance horaire	0,80		
Pics journaliers	0,53		
Besoins/Conso, journalier	0,67		

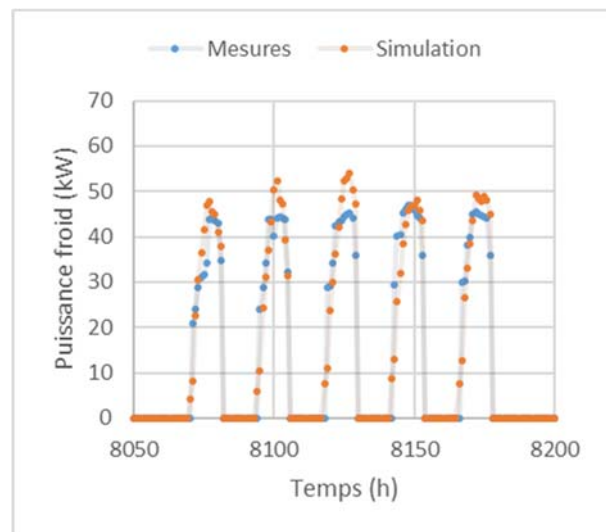
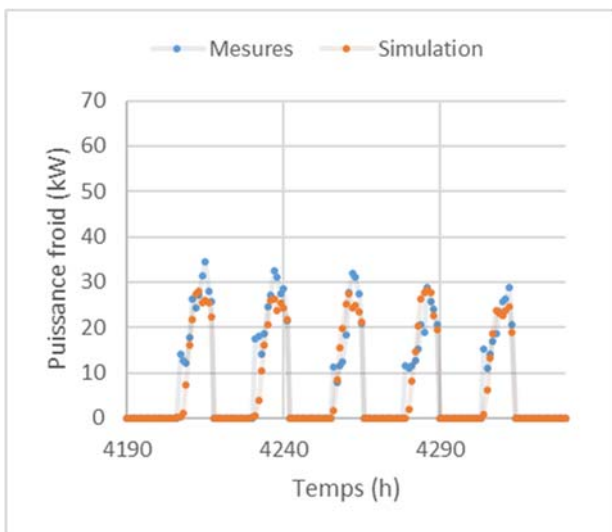
<sup>23</sup> Les énergies et puissance sont ramenées par m<sup>2</sup> de surface climatisée

Nota : la valeur annuelle a été estimée en sommant les valeurs mensuelles de juillet à décembre et en multipliant le résultat par 2. De même, la monotone est estimée uniquement sur ces 6 mois. On suppose donc que le comportement des mois restant (de janvier à juin) est symétrique.

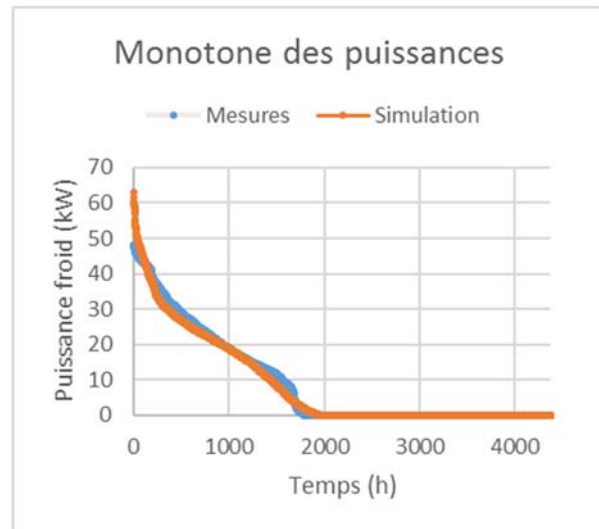
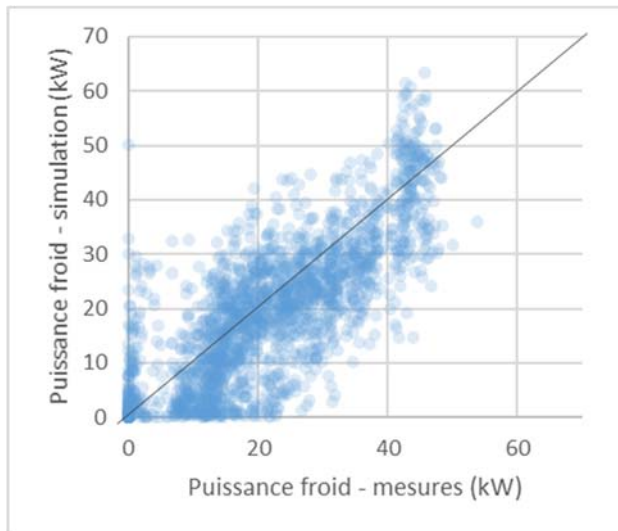
On observe que bien que validé en consommation annuelle, des écarts non-négligeables, autour de 20%, subsistent à l'échelle des mois. La demande maximale est surestimée par le modèle, mais les monotones de puissances semblent relativement proches en dehors des 5% plus grandes valeurs. Ceci pourrait s'expliquer par une saturation des systèmes dans la réalité non prise en compte dans le modèle.

En revanche, les coefficients de corrélation indiquent que les évolutions des courbes de charges sont bien cohérentes. On peut donc conclure que le modèle prend en compte de suffisamment fiable les différents phénomènes impactant la demande de froid, notamment aux vues des incertitudes relativement importante concernant l'occupation et les charges internes. L'obtention de résultats plus précis nécessiterait une connaissance plus précise de ces dernières en instrumentant les différents usages.

Les figures suivantes permettent de comparer mesures et résultats de simulation sur deux périodes représentatives, l'une favorable et l'autre défavorable (notons que sur ces graphiques, les mesures ne sont pas filtrées ; on peut donc observer les pics à la relance correspondant probablement à la remise en température de l'eau-glacée, non prise en compte dans le modèle). Une vue d'ensemble est donnée par le 3<sup>ème</sup> graphique donnant les résultats de simulation en fonction des mesures (des résultats identiques donnerait une bissectrice). La forme de « S » inversé observée indique que le modèle sous-estime les faibles puissances et surestime les fortes puissances. Ce dernier point correspondrait au phénomène de saturation. Le premier point est peu préjudiciable étant donné que le dimensionnement des systèmes de froid dépend surtout des pics.







## 0.2 Aile de la faculté de lettres de l'université de la Réunion

	Mesures	Simulation	Ecart relatif / mesures (%)
Besoin/Conso, Annuelle (kWh/m <sup>2</sup> /an)	74,2	68,2	-8
Besoin/Conso, Mensuelle (kWh/m <sup>2</sup> /an)			
Janvier	8,8	6,1	-31
Février	14,4	13,6	-6
Mars	8,6	6,9	-20
Avril	10,0	10,4	4
Mai	4,9	2,4	-50
Juin	1,6	0,9	-41
Juillet	0,0	0,0	0
Aout	1,0	1,1	11
Septembre	4,1	5,8	40
Octobre	5,9	8,2	39
Novembre	8,7	8,4	-3
Décembre	6,2	4,4	-29
Maximum (W/m <sup>2</sup> )	105,1	128,2	22
Monotone de puissance (W/m <sup>2</sup> )			
à 5 %	47,9	45,7	-4
à 10 %	34,3	32,8	-4
à 20 %	18,6	14,0	-25
à 30 %	0,0	0,0	0,0

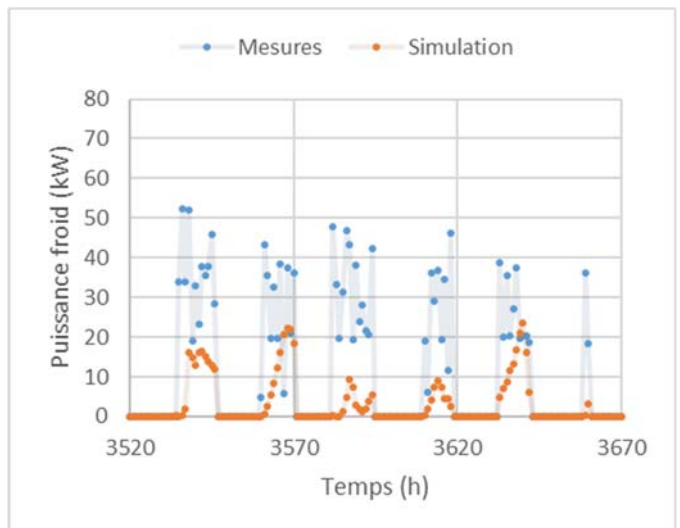
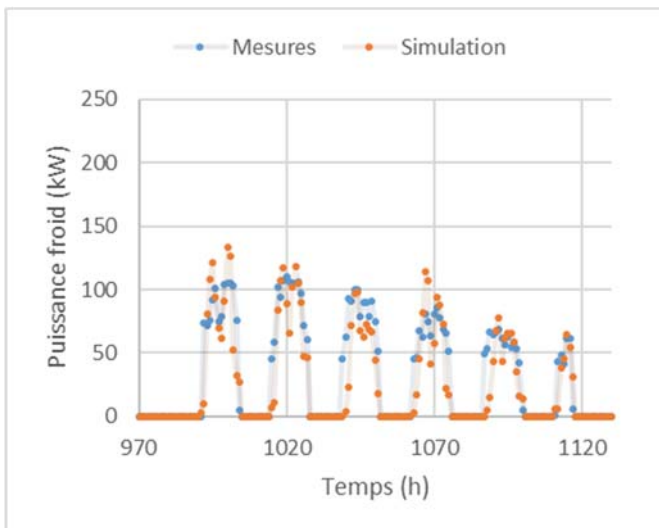
à 50 %	0,0	0,0	0,0
Puissance installée (W/m <sup>2</sup> )	226		
Coefficients de corrélation (-)			
Puissance horaire	0,76		
Pics journaliers	0,54		
Besoins/Conso, journalier	0,86		

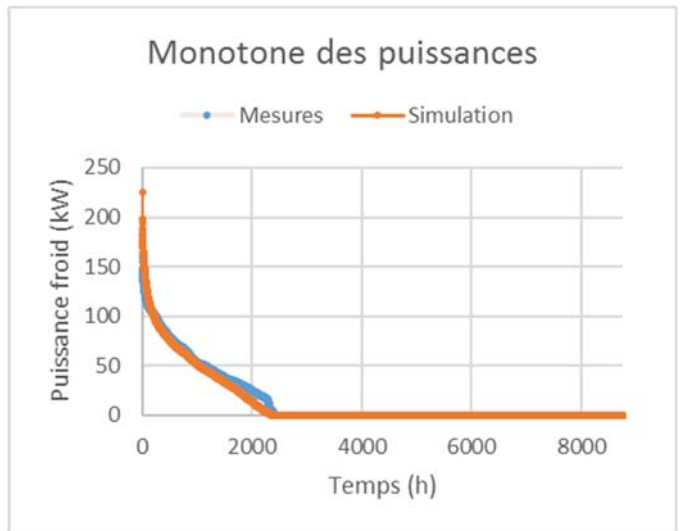
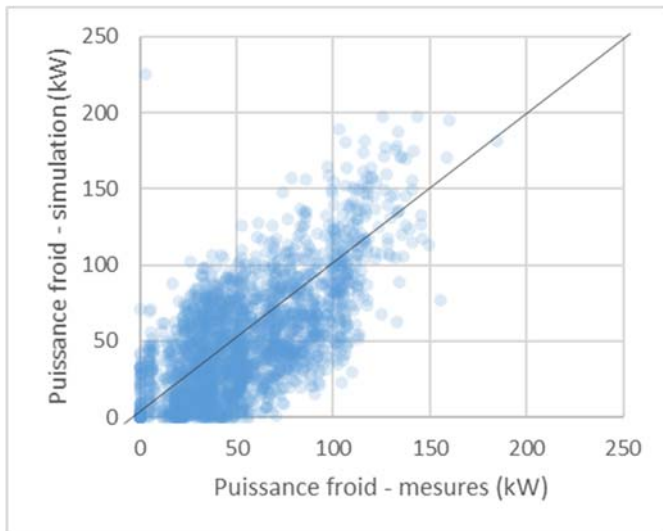
On observe que bien que validé en consommation annuelle, des écarts non-négligeables subsistent à l'échelle des mois, surtout lorsque les consommations sont les plus faibles. La demande maximale est surestimée par le modèle, mais les monotones de puissances semblent relativement proches en dehors des 5% plus grandes valeurs.

En revanche, les coefficients de corrélation indiquent que les évolutions des courbes de charges sont relativement cohérentes. On peut donc conclure que le modèle prend en compte de façon suffisamment fiable les différents phénomènes impactant la demande de froid, notamment aux vues des incertitudes relativement importante concernant l'occupation, des charges internes et de la ventilation. L'obtention de résultats plus précis nécessiterait une connaissance plus précise de ces dernières en instrumentant ses usages.

Les figures suivantes permettent de comparer mesures et résultats de simulation sur deux périodes représentatives, l'une favorable et l'autre défavorable. On observe notamment sur le 2<sup>ème</sup> graphique que le système semble limité en termes de puissance minimale délivrée (autour de 20 kW).

Une vue d'ensemble est donnée par le 3<sup>ème</sup> graphique donnant les résultats de simulation en fonction des mesures (des résultats identiques donnerait une bissectrice). On observe effectivement que les puissances délivrées par le système (d'après les mesures) sont bornées inférieurement.





### 0.3 Entrepôt pharmaceutique de Saint-Gilles les Bains

	Mesures	Simulation	Ecart relatif / mesures (%)
Besoin/Conso, Annuelle (kWh/m <sup>2</sup> /an) [estim,]	169,4	163,5	-3
Besoin/Conso, Mensuelle (kWh/m <sup>2</sup> /an)			
Janvier	15,2	17,5	15
Février [estim,]	17,2	18,4	7
Mars	18,2	19,4	6
Avril [estim,]	15,8	15,9	0
Mai [estim,]	10,8	6,9	-36
Juin	7,4	3,7	-50
Maximum (W/m <sup>2</sup> )	62,6	90,3	44
Monotone de puissance (W/m <sup>2</sup> ) [estim,]			
à 5 %	53,8	60,9	10
à 10 %	53,0	58,5	7
à 20 %	48,6	51,9	-1
à 30 %	37,9	37,4	-43
à 50 %	25,9	14,6	0,0
Puissance installée (W/m <sup>2</sup> )	74,7		
Coefficients de corrélation (-)			
Puissance horaire	0,82		
Pics journaliers	0,81		

Besoins/Conso, journalier	0,81	
---------------------------	------	--

Nota : la valeur annuelle a été estimée en sommant les valeurs mensuelles de janvier à juin et en multipliant le résultat par 2. Les valeurs mensuelles incomplètes ayant elles-mêmes été majoré au prorata des jours manquant. De même, la monotone est estimée uniquement sur ces 6 mois. On suppose donc que le comportement des mois restant (de janvier à juin) est symétrique.

On observe que bien que validé en consommation annuelle, des écarts non-négligeables subsistent à l'échelle des mois, surtout lorsque les consommations sont les plus faibles. La demande maximale est surestimée par le modèle, mais les monotones de puissances semblent relativement proches en dehors des 5% plus grandes valeurs et des plus faibles.

Le coefficient de corrélation entre les besoins journaliers mesurés et simulés est très bon, contrairement aux pics et à la puissance horaire. Les bilans énergétiques journaliers des différents phénomènes semblent donc bien pris en compte, mais en revanche leur dynamique horaire est plus difficilement prise en compte.

Les figures suivantes permettent de comparer mesures et résultats de simulation sur deux périodes représentatives, l'une favorable et l'autre défavorable. On observe notamment sur le 2<sup>ème</sup> graphique que le système semble limité en termes de puissance minimale délivrée (entre 10 et 20 kW).

Une vue d'ensemble est donnée par le 3<sup>ème</sup> graphique donnant les résultats de simulation en fonction des mesures (des résultats identiques donnerait une bissectrice). On observe effectivement que les puissances délivrées par le système (d'après les mesures) sont bornées inférieurement, et les maximums surestimés par le modèle.

