

CLIMESTIM

Un outil simplifié et opérationnel pour estimer les consommations de climatisation des bâtiments tertiaires à La Réunion et en métropole

Rapport final

mai 2026

rédigé par



ENERTECH SCOP



Floriane MERMOUD floriane.mermoud@fmde.re 0693 20 77 44

Le projet CLIMESTIM est lauréat de l'appel à projets de recherche ADEME « Bâtiments Responsables » 2022.

Référente ADEME : Céline LARUELLE celine.laruelle@ademe.fr 04 93 95 72 53



Table des matières

NOMENCLATURE.....	4
<u>I. INTRODUCTION</u>	<u>5</u>
1. PHILOSOPHIE DU PROJET CLIMESTIM	5
2. GRANDES LIGNES DE LA METHODOLOGIE	6
A. COUPLAGE MESURES/STD	6
B. MESURES.....	6
C. SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES (STD).....	6
<u>II. METHODOLOGIE GENERALE</u>	<u>7</u>
1. OUTIL REUNION.....	7
A. MESURES	7
B. SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES (STD).....	14
C. CONSTRUCTION DE L'OUTIL.....	15
2. OUTIL METROPOLE.....	17
A. MESURES	17
B. SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES (STD).....	20
C. CONSTRUCTION DE L'OUTIL.....	22
<u>III. CONFRONTATION AVEC DES DONNEES ISSUES DE BATIMENTS INSTRUMENTES</u>	<u>23</u>
1. REUNION	23
A. SITES GEG.....	24
B. SITES VRV	25
C. CONCLUSIONS	25
2. METROPOLE	26
A. SUR LES BATIMENTS INSTRUMENTES DANS LE CADRE DU PROJET.....	26
B. TESTS SUR D'AUTRES BATIMENTS MESURES PAR ENERTECH DANS LE CADRE D'AUTRES PROJETS.....	28
<u>IV. SUITES A DONNER</u>	<u>29</u>
<u>ANNEXE 1 : RAPPORT STD</u>	<u>30</u>
1. PRESENTATION DES BATIMENTS ETUDIES	30
A. LA REUNION	31
B. FRANCE METROPOLITAINE	35
2. STD.....	39
A. METHODOLOGIE.....	39
B. DONNEES METEOROLOGIQUES	40
C. HYPOTHESES	42

D.	MODELES THERMIQUES	43
E.	CALIBRAGE ET VALIDATION.....	47
F.	ETUDE PARAMETRIQUE : ANALYSE DE SENSIBILITE	51
G.	ETUDE PARAMETRIQUE : EFFETS CROISES	58
3.	CONCLUSION	62
 ANNEXE 2 : TEST DE L'OUTIL SUR DES SITES REELS		64
1.	SITES REUNION.....	64
A.	SITES GEG.....	64
B.	SITES VRV	67
2.	SITES METROPOLE	70

Nomenclature

Abréviations

DHU	Degrés-heure unifiés : Différence entre la température extérieure réelle et la température ambiante intérieure en moyenne horaire
EG	Eau glacée
GEG / GF	Groupe d'eau glacée / Groupe froid
GTC	Gestion Technique centralisée
STD	Simulation Thermique Dynamique
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
VRV	Variable Refrigerant Volume (climatisation à détente directe)

Surfaces

SDP	Surface de plancher	SDP = surface intérieure hors épaisseur des murs, parkings, locaux techniques, cages d'escaliers
SUB	Surface utile brute	SUB = SDP – circulations verticales (ascenseurs)
SUN	Surface utile nette	SUN = surface de bureaux + salles de réunion + autres espaces de travail = SUB – circulations horizontales (couloirs, halls, paliers d'escaliers et d'ascenseurs, etc.) – sanitaires – parties communes (cafétéria, salle de pause, etc.)

Indicateurs de Performances

EER	Energy Efficiency Ratio	$EER = \frac{kWf \text{ produits}}{kWe \text{ absorbés}}$
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio	$SEER = \frac{kWhf \text{ produits}}{kWh \text{ consommés}} \text{ sur une période donnée}$

Unités et sigles

We, kW _e	watt, kilowatt électrique (puissance)
Wf, kW _f	watt, kilowatt froid (puissance)
W _{ut}	watt utile (puissance)
kW _{inst}	kilowatt froid installé (puissance installée)
kW _{he} , MW _{he}	kilowattheure, mégawattheure électrique (énergie)
kW _{hf} , MW _{hf}	kilowattheure, mégawattheure froid (énergie)
kW _{hut}	kilowattheure utile

I. INTRODUCTION

1. Philosophie du projet CLIMESTIM

Dans la continuité des projets SWACool¹ et Tropiclim², l'objectif du projet CLIMESTIM était d'établir un moteur de calcul « réaliste » de la demande de froid ET d'électricité liée à la climatisation d'un bâtiment tertiaire en fonction de ses caractéristiques, basé sur des résultats de mesure couplés à une approche STD.

Dans le cadre du projet, un travail symétrique a été mené à La Réunion et en métropole – où on retrouve les mêmes problématiques concernant le poids croissant des consommations liées à la climatisation – avec deux outils distincts (deux moteurs de calcul différents adaptés à des climats et des pratiques différentes) mais basés sur une méthodologie générale commune.

La cible de l'outil est les bâtiments équipés de systèmes de climatisation centralisés équipés de GEG ou de systèmes VRV applicables dans les bâtiments tertiaires de bureaux (hors split-system), typiquement d'une surface supérieure à quelques centaines de m². L'objectif est particulièrement de constituer un outil d'accompagnement dans le cadre de l'application du décret tertiaire.

L'outil s'adresse prioritairement aux maîtres d'ouvrage (soient les acteurs soumis au décret tertiaire) et à leurs partenaires : il a été conçu pour être à la fois facile d'utilisation et complet et permet :

- d'estimer la consommation de froid ET d'électricité liée à la climatisation d'un bâtiment tertiaire moyennant un minimum de paramétrage
- d'évaluer les gains potentiels lors de la mise en œuvre d'une action de performance énergétique

La particularité de l'outil est qu'il prend en compte les dérives d'usage et de fonctionnement (ex : fonctionnement 24h/24, température de consigne trop basse, surdimensionnement du GEG et de la pompe de distribution, etc.), ce que ne font pas les outils existants basés exclusivement sur de la simulation. Or ces dérives ont un impact considérable sur les consommations au final comme l'a mis en évidence le projet SWACool.

En termes de méthodologie, l'outil se base sur des résultats de mesure sur une année (4 bâtiments équipés de GEG et 4 bâtiments équipés de VRV, à La Réunion comme en métropole, soient 16 bâtiments en tout) couplés à des résultats de simulation.

Le présent rapport synthétise la méthodologie générale et les résultats obtenus dans le cadre du projet.

¹ Projet SWACool « Potentiel de réduction de la demande de froid en climat tropical et optimisation du raccordement des bâtiments à un réseau de froid vertueux », lauréat de l'APR ADEME « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 », 3^{ème} édition, Green Tech/Enertech/LEU Réunion/Université de La Réunion, 2016-2020, <https://greentech.re/project/projet-swacool-finalise/>

² Projet Tropiclim « Favoriser l'émergence de la climatisation efficace dans le tertiaire à La Réunion », lauréat de l'AP11 PACTE « Améliorer la qualité de la construction dans les territoires ultra-marins », Green Tech/Enertech, 2018-2020, <https://www.caue974.com/en/portail/356/mediatheque/51329/tropiclim.html>

2. Grandes lignes de la méthodologie

a. Couplage Mesures/STD

Le moteur de calcul de la demande de froid se base sur un mélange de mesures sur 4 bâtiments GEG et de simulations thermiques dynamiques :

- les mesures ont permis d'obtenir un profil annuel réaliste de demande de froid d'un bâtiment au pas de temps horaire
- les simulations permettent de s'écarter des conditions de fonctionnement des sites mesurés grâce à une étude paramétrique croisée (= variation de plusieurs paramètres simultanément)
- une part de modélisation physique permet d'estimer l'impact de certains paramètres qu'il n'est pas nécessaire ou difficile de caractériser par STD (pour diminuer le nombre de cas à simuler notamment)

L'objectif est d'atteindre un optimum entre simplicité de la saisie et précision des résultats. L'outil permet différents niveaux de saisie (valeurs par défaut ou saisie personnalisée), plus la saisie des caractéristiques du bâtiment et des équipements techniques est précise, plus la fourchette de résultats est réaliste.

b. Mesures

8 bâtiments de bureaux ont été instrumentés dans chaque territoire, sélectionnés pour avoir une répartition variée en termes géographique, architectural, taille, type de climatisation (par eau glacée ou par VRV), etc.

L'instrumentation a concerné :

- la consommation électrique totale du bâtiment
- la production d'eau glacée (consommation électrique) *pour les sites climatisés par eau glacée*
- la distribution d'eau glacée (débit EG et températures départ/retour, consommation électrique de la pompe de distribution) *pour les sites climatisés par eau glacée*
- les unités extérieures de production de froid (consommation électrique) *pour les sites climatisés par VRV*
- un échantillon de terminaux/unités intérieures (consommation électrique)
- le confort thermique dans quelques locaux choisis (température/hygrométrie)
- données météorologiques, mesurées ou tirées de bases de données disponibles (ensoleillement direct/diffus, température et hygrométrie extérieure)

L'instrumentation s'est étalée sur une année complète (à défaut une saison complète) avec un pas de temps d'enregistrement de 10 min. Les données mesurées ont permis de caler les modèles de simulation thermique dynamique proposés dans le cadre du projet sur les 4 bâtiments climatisés par eau glacée dans chaque territoire.

Les résultats de mesure et enseignements obtenus sont détaillés dans les livrables P2.1 (Réunion) et P2.2 (Métropole).

c. Simulations Thermiques Dynamiques (STD)

Un modèle numérique a été établi pour chacun des bâtiments mesurés (refroidis par eau glacée), et calibré grâce aux mesures (essentiellement en demande de froid annuelle). **La méthodologie et les principaux résultats sont présentés en Annexe 1.**

Une étude paramétrique croisée (= en faisant varier simultanément plusieurs paramètres) a été menée sur chacun des sites (*NB : Les paramètres étudiés ne sont pas les mêmes sur les sites Réunion et Métropole*).

Parmi les résultats de simulation, seule la **demande de froid annuelle** a été exploitée dans le moteur de calcul.

II. METHODOLOGIE GENERALE

1. Outil Réunion

a. Mesures

Sites mesurés

La Figure 1 montre la répartition géographique et le Tableau 1 regroupe quelques caractéristiques des sites étudiés.

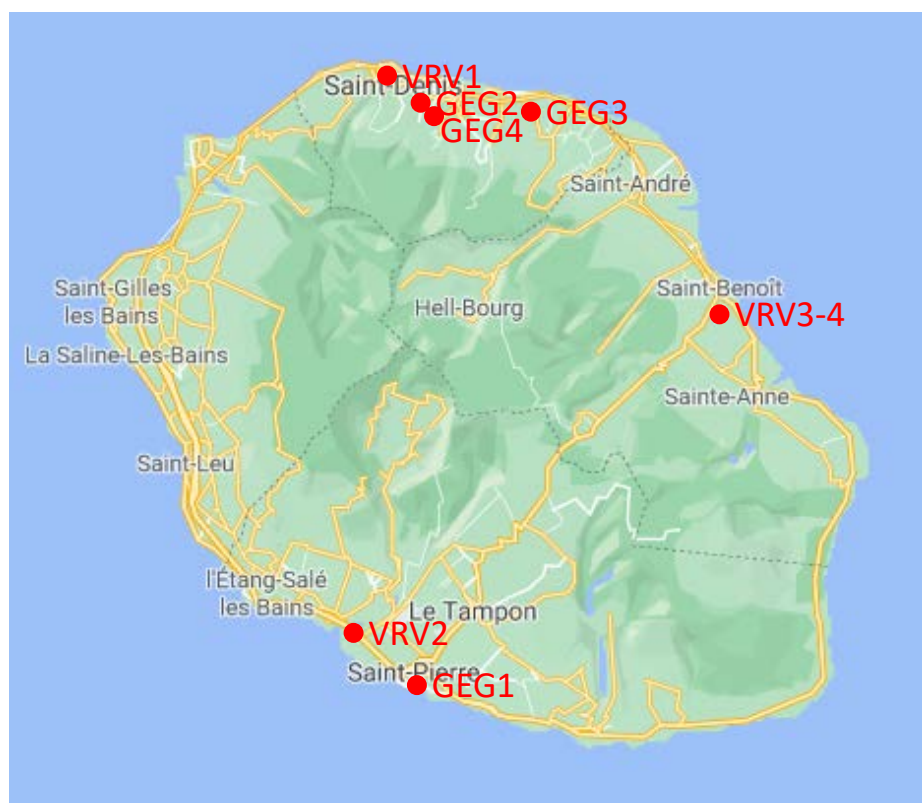


Figure 1 : Emplacement des sites étudiés

Tableau 1 : Caractéristiques des sites étudiés

Réunion	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
période mesure	02.2023-01.2024	12.2022-06.2023	06.2024-05.2025	12.2024-05.2025
type maître d'ouvrage	public	public	privé	privé
localisation	St Pierre	St Denis	Ste Clotilde	Ste Marie
type de bâtiment	compact (6 étages)	3 bâtiments, moyennement compacts (2-3-4 étages)	moyennement compact (3 étages)	peu compact (2 étages)
SUB	3758 m ²	3078 m ²	4000 m ²	1370 m ²
surface climatisée	2718 m ²	1843 m ²	3876 m ²	1200 m ² (890 m ² *)
mise en service clim	2022	2008	2022	2014
GTC	non	oui	non	non
nombre de bureaux	zone d'accueil public, 30 bureaux individuels et 20 open space	90 bureaux	8 locataires et 1 restaurant	NC
toiture isolée	oui	oui	oui	NC
protections solaires	brise-soleil ajourés	brise-soleil fixes	non, films solaires	casquettes solaires et joues
brasseurs d'air	oui	non	non	non
CTA air neuf	non	oui	non	non
débit air neuf	1800 m ³ /h	4200 m ³ /h	NC	4000 m ³ /h
période de climatisation	toute l'année	coupure mi-juin à fin novembre	toute l'année	fin mai à début novembre
profil de climatisation	coupure GEG nuits et we	coupure GEG et VC nuits, we, vacances	coupure GEG nuits et we	24h/24
puissance froide installée	271 kWf	160 kWf	380 kWf	149 kWf
production	1 GEG Carrier, 2 étages	1 GEG Trane, 4 étages	1 GEG Carrier, 6 étages	1 GEG Lennox, 4 étages
distribution EG	débit fixe, 48 m ³ /h	débit fixe, 23 m ³ /h	débit variable, 24-96 m ³ /h	débit fixe, 21 m ³ /h
terminaux	86 cassettes, 18 VC gainables, 6 plafonniers	90 cassettes, 2 VC muraux	185 cassettes	58 VC

* durant la période de mesure, une partie des locaux du site GEG4 n'étaient pas occupés ce qui amène à une surface climatisée de 890 m²

Réunion	VRV1	VRV2	VRV3	VRV4
période mesure	01-12.2024	12.2023-11.2024	02.2024-01.2025	02.2024-01.2025
type maître d'ouvrage	public	public	public	public
localisation	St Denis	St Pierre	St Benoit	St Benoit
type de bâtiment	compact (étage d'un bâtiment)	peu compact (2 étages)	peu compact (4 étages avec grand patio central)	moyennement compact (3 étages)
SUB	1030 m ²	1500 m ²	2300 m ²	1600 m ²
surface climatisée	980 m ²	1180 m ²	1110 m ²	1200 m ²
nombre de bureaux	zone d'accueil public, 10 bureaux, grand open space	62 bureaux	60 bureaux	35 bureaux
toiture isolée		oui	oui	oui
protections solaires	non	non, films solaires	brise-soleil fixes	joues
brasseurs d'air	non	oui	non	non
CTA air neuf	non	non	non	non
débit air neuf	NC	2025 m ³ /h	2840 m ³ /h	4115 m ³ /h
mise en service clim	2015	2020	2012	2019
supervision	non	oui	oui	oui
période de climatisation	toute l'année	toute l'année	toute l'année	toute l'année
profil de climatisation	24h/24	coupure UE et UI nuits et we	24h/24	coupure UE nuits et we
puissance froide installée	105 kWf	124 kWf	128 kWf	145 kWf
production	3 VRV Hitachi	4 VRV Mitsubishi Electric	4 VRV Daikin	3 VRV Gree
terminaux	28 UI plafonniers, 15 UI murales	63 UI murales	63 UI plafonniers, 3 UI murales	53 UI plafonniers

On note que :

- Les sites sont tous en zone côtière (=zone où on trouve les bâtiments tertiaires climatisés à La Réunion).
- Les surfaces des sites étudiés vont de 1000 à 4000 m² de surface climatisée (=cibles du décret tertiaire), avec des puissances froides installées allant de 100 à 400 kWf. Les surfaces des sites en VRV sont plus faibles que celles des sites en EG (1000 à 1200 m² contre 1200 à 4000 m² climatisés). En effet d'un côté les GEG nécessitent une taille critique pour être pertinents, et de l'autre les VRV sont plus difficiles à mettre en œuvre sur des surfaces importantes (en lien avec les grandes quantités de fluide frigorigène qui doivent circuler dans le bâtiment).
- Les architectures des bâtiments sont plus ou moins compactes.
- 3 bâtiments ne disposent pas de protections solaires (et les protections solaires ne sont généralement pas optimisées sur les autres).
- Les années de mise en service de la climatisation vont de 2008 à 2022.
- 6 des 8 bâtiments sont climatisés toute l'année.
- Sur les 4 GEG, seul 1 fonctionne en permanence (les autres sont coupés pendant la nuit et le we). 1 seul GEG est équipé d'une pompe à débit variable. 1 seul site est équipé d'une GTC.
- 2 sites VRV ont mis en place une coupure en inoccupation, sur les 2 autres la climatisation continue de fonctionner si les usagers ne coupent pas leur unité intérieure. Une supervision (proposée par le fournisseur des VRV) est disponible sur 3 des 4 sites.

Principaux résultats

L'ensemble des résultats de mesures sur les sites à La Réunion est décrit dans le livrable 2.1 *Synthèse des résultats de mesure à La Réunion*. Quelques résultats choisis qui ont contribué à la construction de l'outil sont présentés ci-dessous.

Sites équipés de GEG

Dimensionnement

Le Tableau 2 regroupe les ratios spécifiques caractérisant le dimensionnement sur les 4 sites ainsi que les conséquences qui en découlent sur le fonctionnement observé des installations.

Tableau 2 : Ratios spécifiques de dimensionnement de la production EG et de la distribution et conséquences sur le fonctionnement de l'installation sur les 4 sites

Réunion		GEG1	GEG2	GEG3	GEG4	
ratios spécifiques						
Pfroide installée	Wf/m ² clim	100	87	98	124	
débit distribution nominal	m ³ /h/kWfinst	0.18	0.14	<u>0.25</u> (variable)	0.14	
	m ³ /h/m ² clim	0.018	0.012	<u>0.025</u> (variable)	0.018	
conséquences						
production	Pfmax atteinte	Wf/m ² clim	86	79	48	71
	Pfmax représentative (10h> à cette valeur)	Wf/m ² clim	63	75	43	63
	surdimensionnement		1.6	1.2	2.3	2.0
	nb heures équivalentes à Pinstallée		657 h/an	616 h/an	552 h/an	422 h/an
	nb heures équivalentes à Pmax représentative		1044 h/an	712 h/an	1255 h/an	1128 h/an
distribution	conso pompe distrib (mesuré)	We/m ³ /h	92	100	<u>110-115</u>	95
		We/kWfinst	16	14	<u>11-14</u>	13
		We/m ² clim	1.6	1.2	<u>1.0-1.3</u>	1.7
	Tdépart EG		7.5-8.5°C	8-10°C	<u>11-14°C</u>	12-13°C
	Tretour EG		10-13°C	9-12°C	<u>13-15°C</u>	13-14°C
	ΔT		<3 degrés	1.5-4.5 degrés	<3 degrés	<2 degrés

valeurs soulignées : présence d'une variation de débit

Le ratio de puissance froide installée varie entre 87 et 124 Wf/m² climatisé. La puissance froide maximale représentative (10h en-dessus de cette valeur) est plutôt de l'ordre de 60-70 Wf/m² climatisé (43 Wf/m² climatisé pour GEG3, signe d'une occupation moindre ?). Le surdimensionnement entre la puissance installée et la puissance réellement nécessaire est compris entre 1.2 et 2.3 selon les sites.

Consommations spécifiques

Pour permettre la comparaison des sites entre eux, nous avons regroupé les consommations spécifiques de froid EG et d'électricité dédiée à la climatisation EG sur les 4 sites dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Consommations spécifiques de froid EG et d'électricité dédiée à la climatisation sur les 4 sites

Réunion		GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Profil climatisation		coupure GEG nuits et we, 365 jrs/an	coupure GEG et VC nuits, we, vacances, hiver	coupure GEG nuits et we, 365 jrs/an	24h/24, coupure hivernale
Demande annuelle de froid EG	kWhf/m ² /an	66	53	54	71
Conso annuelle électricité (production+distribution EG)	kWhe/m ² /an	30	23	18	38
production EG	kWhe/m ² /an	26	21	14	27
distribution EG	kWhe/m ² /an	4.3	1.6	3.5	<i>11.1</i>
Conso annuelle terminaux	kWhe/m ² /an	4.6	9.3	5.4	5.2
SEER production seule		2.5	2.5	3.8	2.6
EER production horaire		2-3	2-3	2-4.5	2.5-3.5
taux de charge		<60%	jusqu'à 90%	<50%	<30%
SEER distribution incluse		2.2	2.4	3.1	1.9
SEER global (avec terminaux)		1.9	1.7	2.3	1.6
Conso spécifique distribution	kWhe/MWhf	66	30	64	157

en italique : valeurs estimées

On constate que :

- La demande de froid varie entre 53 kWh/m² climatisé/an (GEG2 avec coupure inoccupation et hivernale) et 71 kWh/m² climatisé/an (GEG4 avec coupure hivernale mais fonctionnement 24h/24).
- La consommation d'électricité nécessaire à la production EG varie entre 14 et 27 kWhe/m²/an, celle de la pompe de distribution EG entre 1.6 et 11.1 kWhe/m²/an.

- La consommation des terminaux a été estimée sur la base des mesures sur un échantillon plus ou moins important selon les sites. Elle varie entre 5 et 10 kWh/m² climatisé/an.
- Les performances instantanées de la production EG (EER) varient majoritairement entre 2 et 4.5 selon les conditions de fonctionnement et les sites. **Le SEER annuel de la production EG seule est compris entre 2.5 et 3.8 selon les sites.** Le site avec les « meilleures » performances est GEG3 probablement grâce à la température de départ EG élevée.

Sites équipés de VRV

Dimensionnement

Le Tableau 4 regroupe les ratios spécifiques caractérisant le dimensionnement sur les 4 sites ainsi que les conséquences qui en découlent sur le fonctionnement observé des installations.

Tableau 4 : Ratios spécifiques de dimensionnement de la production EG et de la distribution et conséquences sur le fonctionnement de l'installation sur les 4 sites

Réunion		VRV1	VRV2	VRV3	VRV4	
ratios spécifiques						
Pfroide installée	Wf/m ² clim	107	105	115	121	
Pélec nominale	We/m ² clim	32	27	33	35	
conséquences						
production	Pemax atteinte	We/m ² clim	25	22	44	33
	Pemax représentative (10h > à cette valeur)	Wf/m ² clim	23	21	43	23
	surdimensionnement		1.4	1.3	0.8	1.5
	nb heures équivalentes à Pinstallée		1532 h/an	872 h/an	1193 h/an	553 h/an
	nb heures équivalentes à Pmax représentative		2114 h/an	1152 h/an	903 h/an	844 h/an

Le ratio de puissance froide installée varie entre 105 et 121 Wf/m² climatisé tandis que la puissance électrique nominale correspondante est comprise entre 27 et 35 We/m² climatisé. La puissance électrique maximale représentative (10h en-dessus de cette valeur) est de l'ordre de 20-25 (sauf pour VRV3, qui enregistre des forts dépassements de la puissance électrique nominale sur des périodes significatives ??). Cette valeur est à mettre en relation avec les 60-70 Wf/m² climatisé mesurés sur les sites GEG, ce qui mènerait à un SEER de l'ordre de 3...

Le surdimensionnement est compris entre 1.3 et 1.5 selon les sites (hors VRV3).

Consommations spécifiques

Pour permettre la comparaison des sites entre eux, nous avons regroupé les consommations électriques spécifiques des équipements de climatisation sur les 4 sites dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Consommations spécifiques d'électricité dédiée à la climatisation sur les 4 sites VRV

Réunion		VRV1	VRV2	VRV3	VRV4
Profil climatisation		pas de coupure	coupure VRV (UE+UI) nuits et we, 365 jrs/an	pas de coupure	coupure UE nuits et we, 365 jrs/an
Conso annuelle électricité VRV	kWhe/m ² /an	49	24	39	19
unités extérieures	kWhe/m ² /an	38.7	16.8	35.4	15.9
unités intérieures	kWhe/m ² /an	10.0	6.9	3.6	3.3
	%	21%	29%	9%	17%

en italique : valeurs estimées

On constate que :

- La demande électrique pour la climatisation varie entre 19 kWh/m² climatisé/an (VRV4 avec coupure inoccupation) et 49 kWh/m² climatisé/an (VRV1 en fonctionnement 24h/24 365 jrs/an).
- La consommation d'électricité nécessaire à la production de froid (UE) varie entre 16 et 39 kWh/m² climatisé/an, celle liée à la diffusion de froid (UI) entre 3 et 10 kWh/m² climatisé/an.

Comparaison entre les deux technologies

Performances respectives

Etant donné que les SEER des VRV ne peuvent être mesurés, seule la « mise en œuvre » des technologies peut être comparée par le biais des consommations spécifiques annuelles en électricité des deux types d'installations. *NB : pour être comparables, les valeurs doivent intégrer toutes les consommations liées à la climatisation (à savoir production EG, distribution EG et terminaux pour les GEG, unités extérieures et intérieures pour les VRV).*

Le Tableau 6 présentent les données obtenues sur les 8 sites d'étude à La Réunion :

Tableau 6 : Consommation électrique spécifiques liées à la climatisation pour les 4 sites GEG et le 4 sites VRV en kWh/m² climatisé/an

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4	moyenne	
					globale	365 jr/an / coupure inoccupation
Conso élec globale climatisation* (kWh/m ² climatisé/an)	35	32	23	43	30	28
Période de climatisation	toute l'année	coupure mi-juin à fin novembre	toute l'année	fin mai à début novembre		cas le plus courant
Profil de climatisation	coupure GEG nuits et we	coupure GEG et VC nuits, we, vacances	coupure GEG nuits et we	24h/24		

* prod EG + distrib EG + terminaux

	VRV1	VRV2	VRV3	VRV4	moyenne	
					globale	365 jr/an / coupure inoccupation
Conso élec globale climatisation* (kWh/m ² climatisé/an)	49	24	39	19	32	21
Période de climatisation	toute l'année	toute l'année	toute l'année	toute l'année		cas le plus courant
Profil de climatisation	24h/24	coupure UE et UI nuits et we	24h/24	coupure UE nuits et we		

* unités extérieures + unités intérieures

On note que :

- En moyenne globale sur les 4 sites, on ne note pas de différence significative entre les deux technologies (de l'ordre de 30 kWh/m² climatisé/an)
- Si on considère uniquement les sites avec le profil de consommation le plus courant (climatisation toute l'année avec coupure en inoccupation), **les systèmes VRV ont un léger avantage sur les systèmes GEG (25% de conso en moins)**. *NB : Ce résultat reste cependant à confirmer car les moyennes sont effectuées sur 2 sites seulement pour chaque technologie... Cela s'explique probablement par le fait que les systèmes VRV fonctionnent à détente directe et n'ont donc pas besoin d'auxiliaires (qui consomment de l'énergie) pour fonctionner. D'autre part, l'influence du taux de charge sur les performances est notoirement beaucoup plus faible pour les VRV que pour les GEG (à cause du poids des auxiliaire notamment).*

Caractéristiques d'utilisation de chaque technologie

Le tableau suivant décrit les critères de choix d'une technologie ou l'autre :

Tableau 7 : Caractéristiques d'utilisation des 2 technologies

	GEG	VRV
Investissement	L'investissement de départ est lourd à cause : - du prix intrinsèque de l'équipement de production - des contraintes hydrauliques (nécessité de tirer des réseaux d'eau glacée jusqu'à chaque preneur) => Taille critique pour que la technologie soit pertinente économiquement	Les coûts d'installation sont plus abordables, ce qui les rend plus accessibles pour les installations de petite taille.
Fluide frigorigène	La fluide frigorigène est cantonné à l'intérieur du GEG ce qui fait que les quantités en jeu sont faibles.	Le fluide frigorigène doit circuler dans tout le bâtiment (puisque l'évaporation se fait localement dans chaque bureau) ce qui nécessite de grandes quantités de fluide frigorigène. => Technologie peu adaptée aux grandes surfaces climatisées pour lesquelles les coûts en fluide (au départ mais surtout en cas de fuite) peuvent vite devenir démesurés. De plus la plupart des fluides frigorigènes à faible GWP sont inflammables , ce qui ajoute un risque lorsqu'ils circulent à l'intérieur d'un bâtiment.
Performances	Les performances sont pénalisées par la nécessité d'avoir des auxiliaires (pompes) pour que l'installation puisse fonctionner.	Le fonctionnement à détente directe est intrinsèquement plus performant que le fonctionnement des GEG.
Flexibilité d'utilisation	La variation de la charge se traduit par des cycles de marche/arrêt d'autant plus nombreux que la charge est faible. D'autre part, la coupure à distance des terminaux doit être gérée par un dispositif de commande dédié (GTC).	Les unités de production ont une variation de puissance intégrée (technologies "inverter"). Les VRV sont généralement équipés d'une supervision permettant la commande centralisée des unités extérieures mais aussi intérieures.
Taux de charge	Le taux de charge a un impact important sur les performances (notamment si <10%) à cause du poids des auxiliaires qui ont une consommation fixe même lorsque la production de froid est faible.	Le taux de charge influence peu les performances (qui sont même parfois meilleures à charge partielle).

En conclusion, Aucune des deux technologies ne surpasse l'autre, elles ont des caractéristiques différentes qui rendent leur utilisation plus adaptée dans certaines situations que dans d'autres. De manière générale :

- **Les GEG nécessitent une taille critique** à cause du poids de l'investissement, généralement on parle d'une **surface climatisée >1000m².**
- Les VRV nécessitent de grandes quantités de fluide frigorigène, **ne pas négliger le risque de dérapage des coûts d'exploitation à terme** (quand les fuites apparaîtront) notamment en lien avec les restrictions grandissantes d'utilisation des fluides frigorigènes (et le risque d'explosion des prix qui va avec). **Ce qui les rend plutôt adaptées aux petites surfaces climatisées (<quelques centaines de m²).**
- **La question se pose pour les sites de taille intermédiaire pour lesquels les deux technologies peuvent être pertinentes...**

b. Simulations Thermiques Dynamiques (STD)

La méthodologie utilisée et les résultats obtenus grâce aux STD dans le cadre du projet sont détaillés en Annexe 1. Quelques éléments choisis sont décrits ci-dessous.

Hypothèses de simulation

Les hypothèses de simulation et les résultats du calibrage sont regroupés respectivement dans le Tableau 8 et le Tableau 9.

Tableau 8 : Hypothèses de simulation pour les 4 sites Réunion

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Fichier météo	St Pierre	Moufia	ARRG	ARRG
Simulation	Du 09/02/2023 Au 08/02/2024	Du 01/12/2022 Au 30/06/2023	Du 01/06/2024 Au 31/05/2025	Du 01/11/2024 Au 31/05/2025
Jours spéciaux	Jours fériés Samedi Dimanche	Jours fériés Vacances Dimanche	Jours fériés Dimanche	Jours fériés Fermeture annuelle Dimanche
Albédo	0.2	0.2	0.2	0.2
Isolation de toiture	8 cm	5 cm	8 cm	8 cm
Couleur de toiture	0.977 – noir	0.977 – noir	0.712 – gris	0.977 – noir
Isolation de façade	0.1 cm	0.1 cm	0.1 cm	0.1 cm
Couleur de façade	0.282 – blanc	0.712 – rouge foncé	0.282 – blanc	0.282 – blanc
Protection solaire	Voir modèle	Voir modèle	Aucun	Aucun
Occupants	10 m ² /pers	10 m ² /pers	10 m ² /pers	10 m ² /pers
Eclairage	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²
Equipements	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²
Infiltration	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²
Ventilation mécanique	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers	éteint	25 m ³ /h.pers
Temp. de consigne	26 °C	26 °C	26 °C	27.5 °C
Planning CVC	De 6h à 17h	De 6h à 18h	De 7h à 18h	De 7h à 18h

Tableau 9 : Résultats du calibrage

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Mesuré (MWh)	124.73	36.52	166.17	27.70
Simulé (MWh)	113.84	35.71	167.25	27.80
NMBE (%)	9	1	-1	0
CV(RMSE) (%)	95	103	82	66
R ²	0.74	0.71	0.79	0.86

Le calibrage compare valeurs mesurées et simulées via les métriques :

- NMBE, CV(RMSE), R², selon les critères ASHRAE Guideline 14-2014.
- Objectifs : |NMBE| < 10 % et CV(RMSE) < 30 % en données horaires.

D'après l'étude de sensibilité (cf. Annexe 1), les trois paramètres les plus influents pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- Température de consigne (≈ entre 90 et 165 %)
- Brise-soleils (≈ entre 25 et 55 %)
- Parois verticales (≈ entre 20 et 45 %)

Etude paramétrique croisée

Afin de s'affranchir des interactions entre les différents paramètres, une étude paramétrique croisée a été menée sur un nombre réduit de paramètres :

- environnement (bétonné ou végétalisé)
- présence de protections solaires (brise-soleil fixes) ou pas
- isolation des murs (4 cm de laine de roche) ou pas
- couleur des murs (claire ou sombre)
- ventilation nocturne ou pas
- température de consigne (22 à 28°C par pas de temps de 2 degrés)

Cela a abouti à 128 simulations par site d'étude, soient 512 simulations en tout.

L'impact des autres paramètres influents selon l'analyse de sensibilité (cf. Annexe 1) a été estimé par calcul dans la mesure du possible (pour limiter le nombre de simulations).

c. Construction de l'outil

Le détail des algorithmes et des hypothèses est détaillé dans le livrable P3.2 Notice d'accompagnement à l'outil Réunion.

Sites équipés de GEG

Le processus menant à la demande de froid du bâtiment étudié dans le moteur de calcul est le suivant :

1. Paramétrage du bâtiment étudié par l'utilisateur, utilisation de valeurs par défaut pour les paramètres non renseignés

Puis pour chacun des 4 cas d'étude GEG du projet :

2. Sélection de la simulation qui correspond aux paramètres sélectionnés dans les résultats de l'étude paramétrique croisée
3. Correction de la demande de froid annuelle au prorata de la surface climatisée (règle de 3)
4. Correction des apports solaires en fonction de la surface de vitrage par orientation (cas avec ou sans protections solaires)
5. Correction des apports par la toiture au prorata de la surface de toiture (cas avec ou sans isolation et couleur blanche, grise (toiture tôle) ou foncée (toiture terrasse))
6. Correction des apports internes au prorata des charges internes (occupation, équipements informatiques, éclairage)
7. Correction des apports par ventilation au prorata du débit de renouvellement d'air
8. Correction météo (sites simulés sur la base)
9. Ventilation de la demande de froid annuelle selon le profil de demande de froid du cas d'étude (en %Pmax à chaque pas de temps horaire) avec correction du profil d'occupation du bâtiment étudié par rapport à celui du cas d'étude

Puis le processus menant à la consommation électrique de l'installation GEG dans le moteur de calcul est le suivant :

10. Correction de la demande de froid selon le planning du fonctionnement du GEG (si fonctionnement 24h/24 par exemple)
11. A chaque pas de temps horaire, calcul de l'EER (selon abaque obtenue à partir des mesures et en connaissant le taux de charge instantané) et de la consommation électrique correspondante
12. Calcul de la consommation de la pompe de distribution EG (fixe/variable) à partir des données mesurées
13. Calcul de la consommation des ventilo-convecteurs à partir des données mesurées

fourchette...

NB : L'outil prend soin d'écarter une éventuelle valeur aberrante pour ne pas aboutir à une fourchette trop large.

Sites équipés de VRV

Les étapes 1 à 8 sont identiques pour aboutir à la demande de froid annuelle du bâtiment étudié. Puis le processus menant à la consommation électrique de l'installation VRV dans le moteur de calcul est le suivant :

9. Calcul de la consommation des Unités Extérieures en appliquant un SEER fixe correspondant à des valeurs de référence
10. Calcul de la consommation des Unités Intérieures à partir des données mesurées
On obtient ainsi une demande de froid annuelle et une consommation électrique correspondante basée sur chacun des cas d'étude (soient 4 valeurs de demande de froid et 4 valeurs de consommation électrique).

Scénarios d'amélioration

Les scénarios d'amélioration sont évalués selon le même processus en modifiant simplement le paramétrage du moteur de calcul.

2. Outil Métropole

a. Mesures

Sites mesurés

La Figure 2 montre la répartition géographique et le Tableau 10 regroupe quelques caractéristiques des sites étudiés.



Figure 2 : Emplacement des sites étudiés

Tableau 10 : Caractéristiques des sites étudiés

								
	Bât 1	Bât 2	Bât 3	Bât 4	Bât 5	Bât 6	Bât 7	Bât 8
MOA	Boulogne	Grenoble	La Rochelle	Valbonne	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier
Lieu	Boulogne	Grenoble	La Rochelle	Valbonne	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier
Niveau d'isolation	Bon	Mauvais	Correct	Correct	Mauvais	Mauvais	Bon	Mauvais
Surface (climatisée)	2 890 m ²	12 200 m ²	14 683 m ²	3 200 m ²	111 m ²	1 849 m ²	207 m ²	1 262 m ²
Type de prod. Froid	VRV (x5)	Groupe froid / nappe	Groupe froid / air ext.	Groupe froid / air ext.	VRV	Groupe froid / air ext.	VRV	VRV+splits
début CdM	02/06/2023	08/06/2023	01/06/2023	17/05/2023	22/05/2024	22/05/2024	22/05/2024	22/05/2024
Fin CdM	15/10/2023	11/10/2023	01/10/2023	30/09/2023	29/09/2024	29/09/2024	29/09/2024	29/09/2024
DJU CLIM (base 17) sur la période de mesure	483 DJU	804 DJU	546 DJU	778 DJU	742 DJU	742 DJU	742 DJU	742 DJU

Principaux résultats

Dimensionnement

Tableau 11 : Puissance froide installée sur chaque site mesuré

								
	Bât 1	Bât 2	Bât 3	Bât 4	Bât 5	Bât 6	Bât 7	Bât 8
ELEC - Pélec installée (Unité ext)	29 Wél/m ² inst.	pas d'info.	pas d'info.	20 Wél/m ² inst.	49 Wél/m ² inst.	33 Wél/m ² inst.	pas d'info.	pas d'info.
FROID - Pfroid installée Conditions 27°C / 35°C	68 Wut/m ² inst.	45 Wut/m ² inst.	29 Wut/m ² inst.	57 Wut/m ² inst.	126 Wut/m ² inst.	89 Wut/m ² inst.	106 Wut/m ² inst.	92 Wut/m ² inst.

On observe en moyenne une puissance installée de 77 Wut/m² (min 29 max 126 Wut/m²). La puissance froide réellement fournie est rarement au-dessus de 50% pour les 4 GEG mesurés, et les taux de charge moyens en occupation sont de l'ordre de 10% ! On conseille de ne pas dépasser un dimensionnement de 30 à 50 Wut/m² en puissance utile (ou 10 à 20 We/m² en puissance électrique).

L'EER nominal n'est atteint qu'au bout de 20 à 30% de taux de charge, donc le surdimensionnement entraîne une baisse significative de l'EER moyen.

Consommations spécifiques

La Figure 4 présente les consommations électriques des installations mesurées sur l'ensemble de la saison de climatisation.

Les consommations totales sont « plutôt faibles » dans l'ensemble : 2 à 10 kWh/m² climatisé/an, moyenne à 6 kWh/m² climatisé/an, soit comparable à des consommations annuelles d'éclairage dans un bâtiment « classique ».

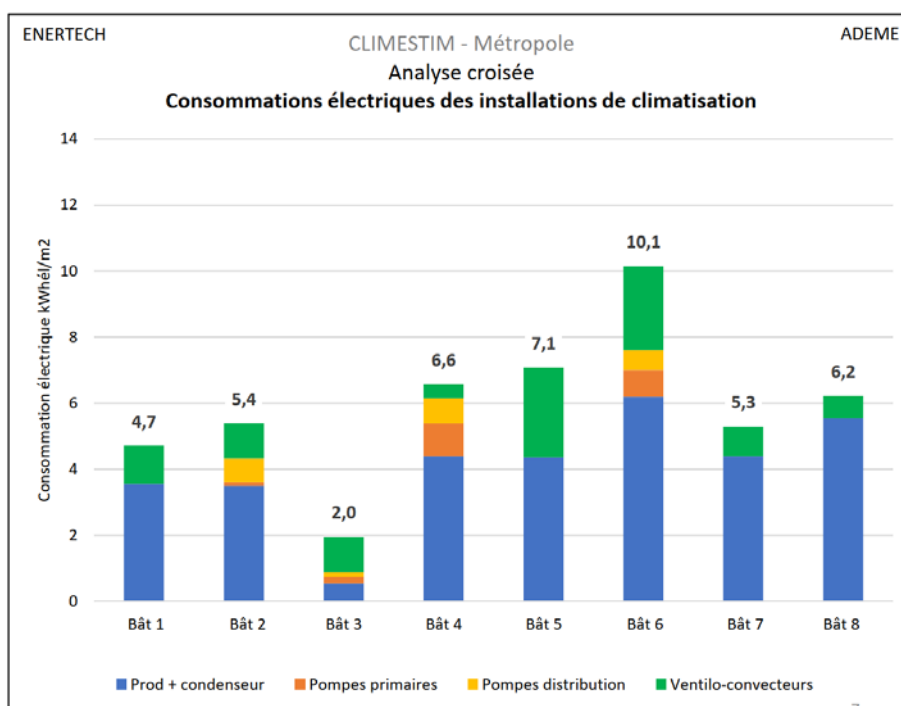


Figure 3 : Consommations électriques des installations mesurées

La part des auxiliaires est très variable, notamment des pompes primaires (entre groupe froid et pompes de distribution) et des ventilo-convecteurs : 6% à 38% de la consommation.

Pistes d'économies

Les principales pistes d'économies identifiées dans la campagne de mesure sont les suivantes :

- **Température de consigne** : l'analyse de la thermosensibilité des consommations d'électricité indiquent qu'1 degré de moins sur la température de consigne implique entre 15 et 30% de consommation supplémentaire.
- **Consommations hors occupation** : beaucoup de productions et d'auxiliaires fonctionnent en inoccupation, particulièrement sur les installations de production d'eau glacée, et ne modulent pas leur puissance en fonction de la demande.
- **Dimensionnement de la production** : comme vu ci-dessus
- **Température de départ d'eau glacée pour les GEG** : l'EER le plus faible mesuré est observé sur la température de production la plus basse (7-8°C)

Corrélation du besoin de froid avec les DHU

La Figure 5 présente la demande de froid sur la saison de climatisation en fonction des DHU réels (=écart horaire mesuré entre ambiance moyenne du bâtiment et météo réelle = max (Text-Tamb;0)).

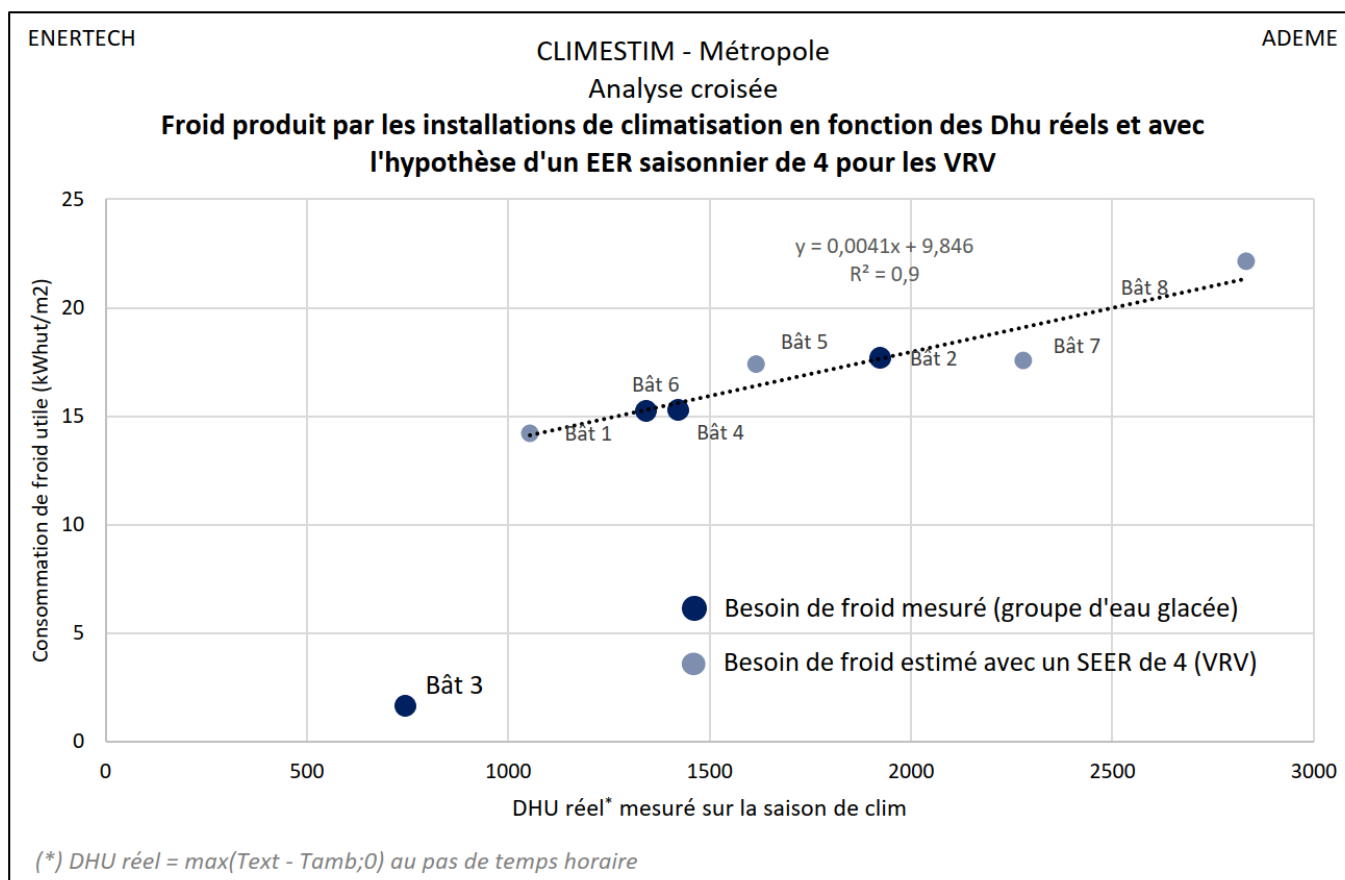


Figure 4 : Consommation de froid en fonction des DHU réels mesurés sur la saison de climatisation

En intégrant les cas VRV avec une hypothèse d'EER saisonnier de 4 (inférieur à ce qu'annoncent les fabricants (>5) et cohérent avec les EER saisonniers mesurés sur les groupes froids), on observe **une assez bonne corrélation entre le besoin de froid et le DHU réel**.

Cette corrélation est le point de départ de la conception de l'outil CLIMESTIM Métropole, avec une hypothèse qui est que l'enveloppe du bâtiment ne joue qu'au 2^e ordre sur le besoin de froid (moins bien isolé = rafraîchit aussi mieux la nuit).

Après avoir identifié cette corrélation, qui peut être un hasard sur seulement 8 bâtiments, le même exercice a été fait en ne considérant que les horaires d'occupation et sur la même plage de temps (cf. Figure 5).

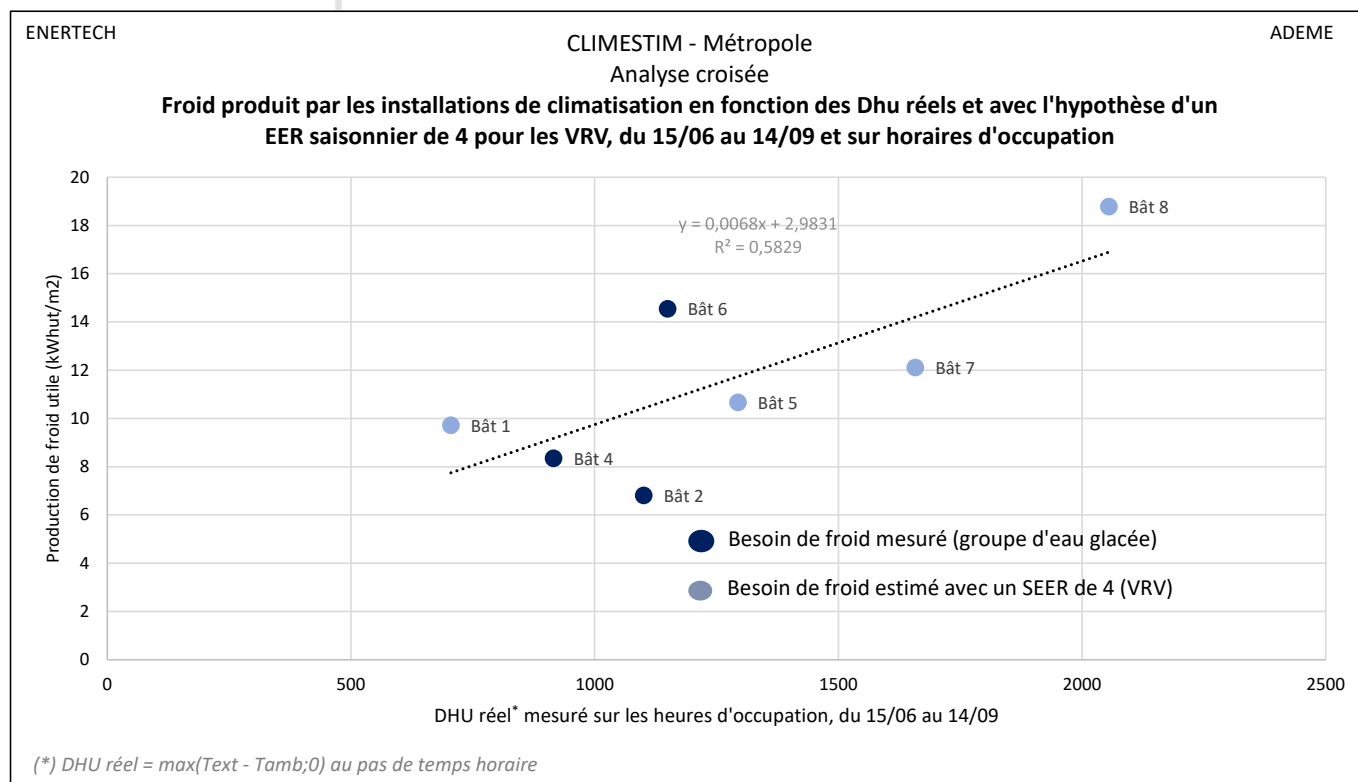


Figure 5 : Consommation de froid en fonction des DHU réels mesurés sur la période d'occupation

La corrélation est moins bonne, mais les écarts sont facilement explicables :

- Le Bât 6 et le Bât 8 sont des bâtiments très vitrés, alors que Bât 7, Bât 5 et Bât 4 sont plutôt peu vitrés.
- Pour le Bât 2, l'explication est moins évidente. Le bâtiment est peu climatisé en moyenne (température ambiante assez élevée), ce qui favorise la décharge nocturne, et l'eau glacée circule en permanence dans le bâtiment, y compris nuit et week-end, ce qui participe à refroidir le bâtiment sans être compté dans le graphique ci-dessus.

b. Simulations Thermiques Dynamiques (STD)

La méthodologie utilisée et les résultats obtenus grâce aux STD dans le cadre du projet sont détaillés en Annexe 1. Quelques éléments choisis sont décrits ci-dessous.

Hypothèses de simulation

Les hypothèses de simulation et les résultats du calibrage sont regroupés respectivement dans le Tableau 11 et le Tableau 12

Tableau 12 : Hypothèses de simulation pour les 4 sites Métropole

	Bât 2 Grenoble	Bât 3 La Rochelle	Bât 4 Valbonne	Bât 6 Montpellier
Fichier météo	CAIPOS	-	Valbonne-Sophia	Villeneuve-lès-Maguelone
Simulation	Du 01/07/2022 Au 14/09/2022	-	Du 17/05/2023 Au 30/09/2023	Du 21/05/2024 Au 06/10/2024
Jours spéciaux	Jours fériés Samedi Dimanche	-	Jours fériés Dimanche	Jours fériés Dimanche
Albédo	0.2	-	0.2	0.2
Isolation de toiture	10 cm	-	10 cm	10 cm
Couleur de toiture	0.977 – noir	-	0.712 – gris	0.712 – gris
Isolation de façade	2 cm	-	5 cm	5 cm
Couleur de façade	0.282 – blanc	-	0.712 – gris	0.434 – ivoire
Protection solaire	Voir modèle	-	Aucun	Aucun
Occupants	10 m ² /pers	-	25 m ² /pers	10 m ² /pers
Eclairage	5 W/m ²	-	3 W/m ²	5 W/m ²
Equipements	10 W/m ²	-	7 W/m ²	10 W/m ²
Infiltration	1.08 m ³ /h.m ²	-	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²
Ventilation mécanique	25 m ³ /h.pers	-	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers
Temp. de consigne	28 °C	-	26 °C	28 °C
Planning CVC	De 7h à 19h	-	De 6h à 20h	De 10h à 18h

Tableau 13 : Résultats du calibrage

	Bât 2 Grenoble	Bât 3 La Rochelle	Bât 4 Valbonne	Bât 6 Montpellier
Mesuré (MWh)	79.59	-	23.31	19.53
Simulé (MWh)	81.92	-	22.50	18.78
NMBE (%)	-3	-	3	4
CV(RMSE) (%)	85	-	137	188
R ²	0.78	-	0.61	0.59

Le calibrage compare valeurs mesurées et simulées via les métriques :

- NMBE, CV(RMSE), R², selon les critères ASHRAE Guideline 14-2014.
- Objectifs : |NMBE| < 10 % et CV(RMSE) < 30 % en données horaires.

Les trois paramètres les plus influents pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- Température de consigne (≈ entre 100 et 175 %)
- Brise-soleils (≈ entre 50 et 160 %)
- Renouvellement d'air (≈ entre 30 et 60 %)

c. Construction de l'outil

La méthodologie générale de l'outil se base sur la corrélation assez forte identifiée sur les 8 bâtiments mesurés entre le besoin de froid et les DHU sur la saison de climatisation (cf. Figure 5), d'une part, et sur l'étude de sensibilité réalisée par STD, d'autre part. Le détail des algorithmes et des hypothèses est détaillé dans le livrable P4.2 Notice d'accompagnement de l'outil Métropole, en voici un résumé succinct :

1. Calcul d'un besoin de froid « brut » :
 - On calcule les DHU, en fonction des horaires d'occupation, de la météo du site, de la température de consigne de climatisation et des horaires de fonctionnement de la climatisation (notamment coupé hors occupation ou pas).
 - On calcule le besoin de froid brut en fonction de ces DHU, grâce à des coefficients définis à partir des mesures des 8 bâtiments.
2. Calcul du besoin de froid « corrigé » : correction du besoin de froid « brut » en fonction des caractéristiques du bâtiment : apports internes électriques et humains, apports solaires (taux de vitrage, présence de protections solaires). Les différents coefficients de correction ont été tirés des STD réalisées sur les 4 bâtiments en GEG. Ça nous donne la 1^{ère} sortie de l'outil : **estimation du besoin de froid**.
3. Calcul de la consommation électrique, à partir du besoin de froid et de l'EER du moyen de production (issu des mesures), et calcul de la consommation des auxiliaires, également à partir des données de mesures. Ça nous donne la 2^{ème} sortie de l'outil : **estimation de la consommation électrique du système de climatisation**.
4. Propositions d'améliorations du système pour baisser la consommation de climatisation : les propositions d'améliorations sont principalement issues des pertes et gaspillages identifiés par les campagnes de mesure : production et auxiliaires non coupés hors occupation, surdimensionnement des productions et des pompes, températures de consigne, etc...

III. CONFRONTATION AVEC DES DONNEES ISSUES DE BATIMENTS INSTRUMENTES

1. Réunion

Nous avons testé l'outil sur les 8 sites instrumentés dans le cadre du projet pour voir s'il renvoyait bien des valeurs cohérentes par rapport aux mesures. Nous avons également inclus 2 sites de bureaux supplémentaires pour lesquels nous disposons de données de mesure sur une année complète :

- Site bureaux SWACool (bâtiment refroidi par GEG étudié dans le cadre du projet SWACool¹)
- VRV5 (bâtiment refroidi par VRV étudié dans le cadre du projet CLIMESTIM mais non pris en compte dans la construction du moteur de calcul car trop petit (~300 m²)

Le Tableau 13 regroupe les principales hypothèses utilisées pour le paramétrage de l'outil pour chacun des sites. Elles ont de manière générale été relevées/mesurées sur site (notamment les températures de consigne et d'eau glacée).

Concernant les protections solaires : l'outil simule uniquement des brise-soleils fixes (\pm le plus performant et le plus courant à La Réunion), mais certains sites sont équipés d'autres types de protections solaires moins performantes : dans ces cas, nous avons testé l'outil avec et sans protections solaires pour en étudier l'impact.

Tableau 14 : Principales hypothèses de paramétrage de l'outil pour l'ensemble des sites

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4	CAF St Paul (SWACool)	VRV1	VRV2	VRV3	VRV4	VRV5
Zone météo	St Pierre	St Denis	St Denis	St Denis	Le Port	St Denis	St Pierre	St Benoit	St Benoit	St Denis
Environnement	bétonné	végétalisé	végétalisé	végétalisé	bétonné	bétonné	végétalisé	végétalisé	végétalisé	végétalisé
Surface climatisée (m ²)	2988	1977	3002	890	1229	980	1180	1110	1200	377
Part surface non climatisée	18%	36%	34%	44% (une partie non occupée)	6%	5%	21%	52% (atrium intérieur)	25%	14%
Isolation toiture	oui	oui	oui	oui	non	étage bât.	oui	oui	oui	non
Part vitrage (m ² vitrage/m ² façades)	19%	24%	15%	24%	normal (20%)	normal (20%)	normal (20%)	normal (20%)	normal (20%)	normal (20%)
Protections solaires	oui/non (panneaux perforés)	oui (brise-soleil fixes)	non (films solaires)	oui/non (joues)	oui/non (au R+1 mais pas au RDC)	non	non (films solaires)	oui (brise-soleil verticaux)	oui/non (joues)	non
Occupation moyenne (pers.)	234	161	235	80	12 m ² clim/pers.	60	70	84	50	12 m ² clim/pers.
Planning d'occupation	lun-ven 6h-17h	lun-ven 6h-18h	lun-ven 7h-18h	lun-ven 8h-18h	lun-ven 6h-17h	lun-ven 7h-18h	lun-ven 8h-17h	lun-ven 8h-18h	lun-ven 8h-18h	lun-ven 8h-16h
Informatique	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal
Eclairage	LED	LED	LED	LED	fluocompact	fluocompact	LED	LED	LED	fluocompact
GEG/VRV	GEG	GEG	GEG	GEG	GEG	VRV	VRV	VRV	VRV	VRV
Pinstallée (kWf)	271	160	380	149	100.5	105	124	128.5	145.5	50
ancienneté	après 2020	avant 2010	après 2020	avant 2010	avant 2010	avant 2020	avant 2020	avant 2020	avant 2020	avant 2020
Tconsigne	26°C	26°C	26°C	27°C	25°C	26°C	26°C	25°C	26°C	27°C
Tdépart EG	10°C	8°C	12°C	12°C	7°C					
débit EG (m3/h/kWfinst)	0.18	0.14	variable	0.14	0.17					
planning fct clim	idem occupation	idem occupation	idem occupation	24h/24 7j/7	idem occupation	24h/24 7j/7	idem occupation	24h/24 7j/7	24h/24 7j/7	idem occupation
période fct clim	365 j/an	coupure hivernale et vacances	365 j/an	coupure hivernale	365 j/an	365 j/an	365 j/an	365 j/an	365 j/an	coupure hivernale et vacances
débit renouv. d'air (m3/h)	25 m3/h/pers.	4222	0 (RA coupé)	4000	0 (CTA DD)	25 m3/h/pers.	2025	2840	4115	0

en italique : valeurs par défaut

a. Sites GEG

Les résultats par site sont présentés en Annexe 2. Le Tableau 14 regroupe les valeurs de consommation mesurées sur les sites GEG (demande de froid et consommation électrique de la production, distribution et terminaux EG) et les fourchettes renvoyées par l'outil pour les mêmes éléments.

Tableau 15 : Comparaison des données de consommation mesurées sur les sites GEG étudiés avec les valeurs renvoyées par l'outil

		GEG1			GEG2		GEG3			GEG4				site bureaux SWACool		
		mesures	outil sans BSO	outil avec BSO	mesures	outil avec BSO	mesures	outil sans BSO	-5%/K EG		outil sans BSO	outil avec BSO	-5%/K EG + GEG neuf	mesures	outil sans BSO	outil avec BSO
Demande de froid	MWh/an	178	260-310	180-220	99	70-105	210	200-260	200-260	63	90-150	70-85	70-85	104	120-160	100-150
Demande électrique clim	MWhe/an	95	110-140	90-110	52	45-55	89	90-120	90-120	38	50-70	45-60	45-55	79	70-90	60-80
dont GEG	MWhe/an	82	75-95	55-75	39	37-44	55	65-85	60-80	24	43-55	34-43	32-41	51	55-70	50-65
dont distrib EG	MWhe/an		10-15	10-15	3	3-4	14	5-10	5-10	10	8-9	8-9	8-9	13	4-5	4-5
dont terminaux EG	MWhe/an	13	25-30	25-30	10	7-8	21	25-30	25-30	5	4-5	4-5	4-5	15	10-15	10-15
SEER		2.5	2.4-3.4	2.2-3.2	2.5	2.2-2.6	3.8	2.9-3.3	3-3.4	2.6	2.3-2.8	1.9-2.3	2-2.5	2.0	2.3-2.6	2.2-2.5

valeur mesurée dans la fourchette
 valeur mesurée proche de la fourchette
 valeur mesurée en dehors de la fourchette

On constate que :

- **La demande de froid mesurée est dans ou proche de la fourchette dans tous les cas.**
- Dans le cas où des protections solaires sont présentes, les valeurs sont **mieux restituées par le paramétrage « avec brise-soleil » que « sans brise-soleil »**, malgré le fait que les protections solaires en place ne sont pas forcément aussi performantes que des brise-soleil fixes.
- **La consommation électrique totale liée à la climatisation est dans ou proche de la fourchette dans 4 cas sur 5.** La répartition de la consommation électrique n'est par contre pas respectée (avec des erreurs qui se compensent).
- La consommation réelle du GEG est dans ou proche de la fourchette dans 4 cas sur 5 (les valeurs restent cohérentes sur le GEG4).
- Les SEER sur les GEG3 et GEG4 sont en-dessous des valeurs réelles, mais des performances bien supérieures aux autres sites avaient déjà été relevées lors de l'analyse des données de mesure (cf. livrable P2.1), peut être en lien avec le fait que la température de production EG est élevée sur ces 2 sites (de l'ordre de 12°C) par rapport aux autres sites (8-10°C). Une correction de -3%/degré a pourtant été appliquée sur la consommation électrique du GEG, de manière conservatrice par rapport aux résultats du projet Pilotclim³ qui a rapporté des réductions de consommation comprises entre -3 et -5%/degré EG. Cela laisse à penser que l'impact de la température de production EG serait supérieur à -3%/degré EG : même en paramétrant -5%/degré EG, on n'arrive pas à reproduire les valeurs mesurées...
- La consommation des pompes de distribution EG est globalement bien restituée, sauf pour GEG3 pour lequel des valeurs très élevées avaient déjà été notées lors de l'analyse des mesures (à cause d'une consommation de veille inexplicite de l'ordre de 450 We).
- La consommation des terminaux EG est difficile à restituer : elle est tour à tour supérieure ou inférieure aux valeurs mesurées (*NB : dans un but de simplification, un ratio unique (We/m² climatisé) a été retenu dans le moteur de calcul*). Il est toutefois à noter que sur tous les sites (hormis le site SWACool), la consommation « mesurée » des terminaux EG a été estimée à partir d'un ou plusieurs échantillons de terminaux qui ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble du bâtiment...

³ Projet Pilotclim « Pilotage des installations de climatisation à eau glacée avec variation de la température de la boucle d'eau glacée », lauréat de l'AAP OMBREE 2 « Sensibiliser, outiller et former les entreprises et les collectivités pour des bâtiments ultramarins économes en énergie », 2^{ème} édition, INSET/IC66/Imageen/Q3E/Université de La Réunion/Laboratoire PIMENT, 2023-2025, <https://www.pergola-outremer.fr/wp-content/uploads/2026/01/pilotclim-rapport-final-ind1.pdf>

b. Sites VRV

Les résultats par site sont présentés en Annexe 2. Le Tableau 15 regroupe les valeurs de consommation mesurées sur les sites VRV (consommation électrique des unités extérieures et intérieures) et les fourchettes renvoyées par l’outil pour les mêmes éléments.

Tableau 16 : Comparaison des données de consommation mesurées sur les sites VRV étudiés avec les valeurs renvoyées par l’outil

		VRV1		VRV2		VRV3		VRV4			VRV5	
		mesures	outil sans BSO	mesures	outil sans BSO	mesures	outil avec BSO	mesures	outil sans BSO	outil avec BSO	mesures	outil sans BSO
Demande électrique clim	MWhe/an	48	33-53	28	17-24	43	29-38	23	30-41	24-31	3.8	3-5
dont UE VRV	MWhe/an	38	24-44	20	11-18	39	20-28	19	19-31	14-20	3	2-4
dont UI VRV	MWhe/an	10	8-9	8	6-7	4	9-10	4	10-11	10-11	0.8	0.5-1

valeur mesurée dans la fourchette
 valeur mesurée proche de la fourchette
 valeur mesurée en dehors de la fourchette

On constate que :

- **L’outil restitue plus difficilement la consommation électrique des VRV que celle des GEG.**
- La consommation électrique totale liée à la climatisation n’est **dans ou proche de la fourchette que dans 3 cas sur 5**. A noter que le site VRV3 est un site très atypique avec plus de la moitié de la surface du bâtiment qui n’est pas climatisée mais qui est incluse dans le volume climatisé (atrium intérieur fermé), avec des échanges inévitables entre les bureaux climatisés et le volume non climatisé, que l’outil ne peut pas quantifier.
- Pour les autres sites, la consommation des unités extérieures VRV est dans ou proche de la fourchette dans tous les cas.
- On observe le même phénomène concernant les unités intérieures VRV que pour les terminaux EG.

c. Conclusions

On retiendra que :

- **L’outil parvient globalement à restituer les valeurs de demande de froid des différents sites**, en appliquant des **brise-soleil fixes** même si les protections solaires en place sont moins performantes.
- **La consommation électrique totale** liée à la climatisation est **bien restituée** dans l’ensemble **pour les sites GEG, un peu moins bien pour les sites VRV**.
- On note cependant des **compensations entre les différentes composantes** (production, distribution, émission) :
 - o La consommation de la production de froid est plus ou moins bien restituée (que ce soit pour les GEG ou les VRV).
 - o La consommation de la distribution est la mieux évaluée par l’outil.
 - o La consommation des terminaux est plus difficile à mesurer à cause de la complexité des bâtiments, si bien que le ratio retenu (issu des mesures) n’est pas forcément représentatif, mais d’un autre côté on n’est pas sûrs de la qualité de la valeur mesurée à laquelle on compare la valeur renvoyée par l’outil...

2. Métropole

a. Sur les bâtiments instrumentés dans le cadre du projet

Nous avons testé l'outil sur les 8 sites instrumentés dans le cadre du projet pour voir s'il renvoyait des valeurs cohérentes par rapport aux mesures, d'abord sur le besoin de froid en occupation :

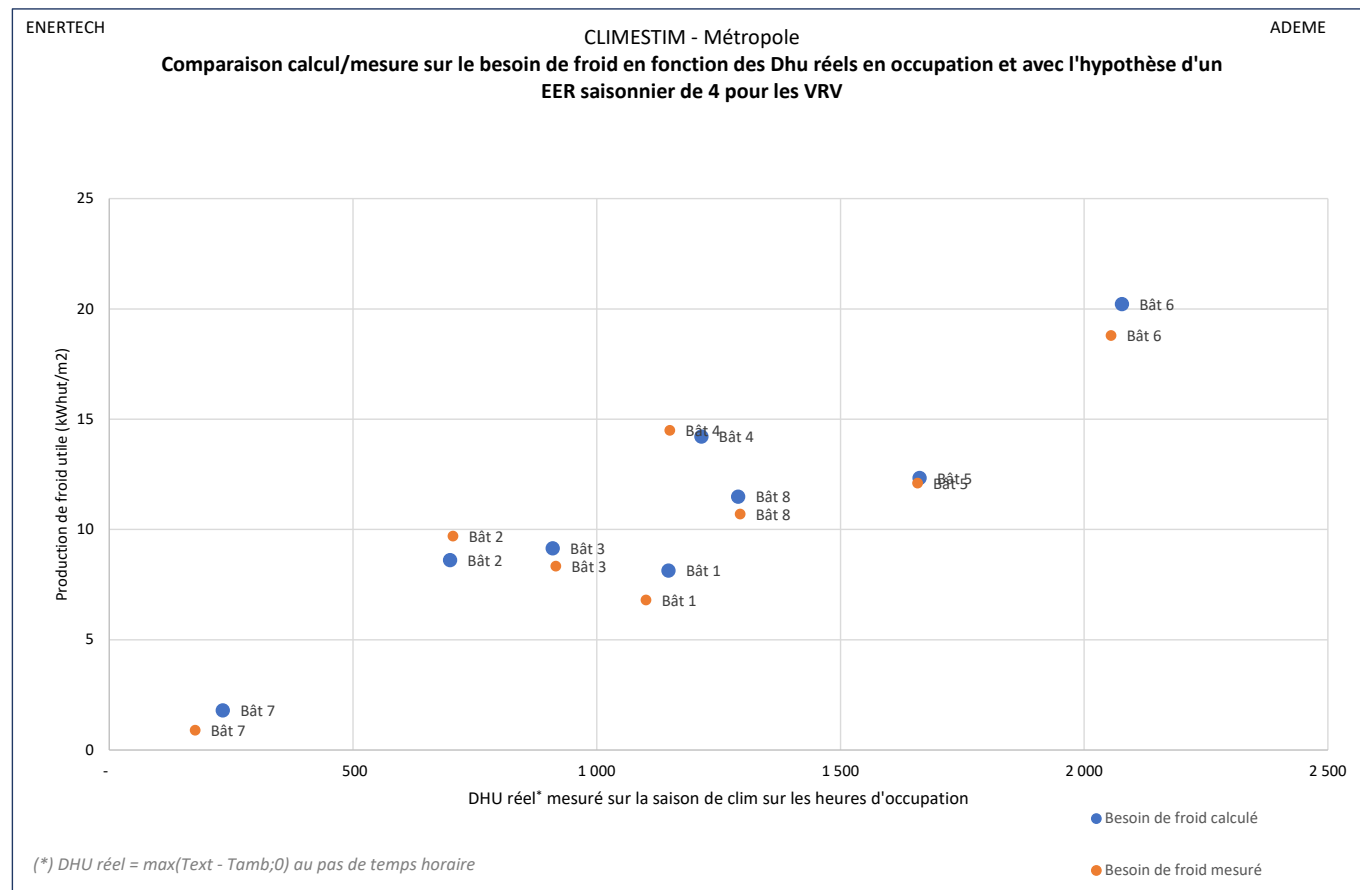


Figure 6 : Valeurs mesurées vs. renvoyées par l'outil pour les bâtiments instrumentés dans le cadre du projet CLIMESTIM

Le besoin de froid est plutôt bien estimé par l'outil sur les 8 bâtiments mesurés. Cette comparaison est faite avec le même fichier météo, qui est la météo réelle des bâtiments mesurés.

Concernant l'estimation de la consommation électrique, voici la comparaison calcul/mesure :

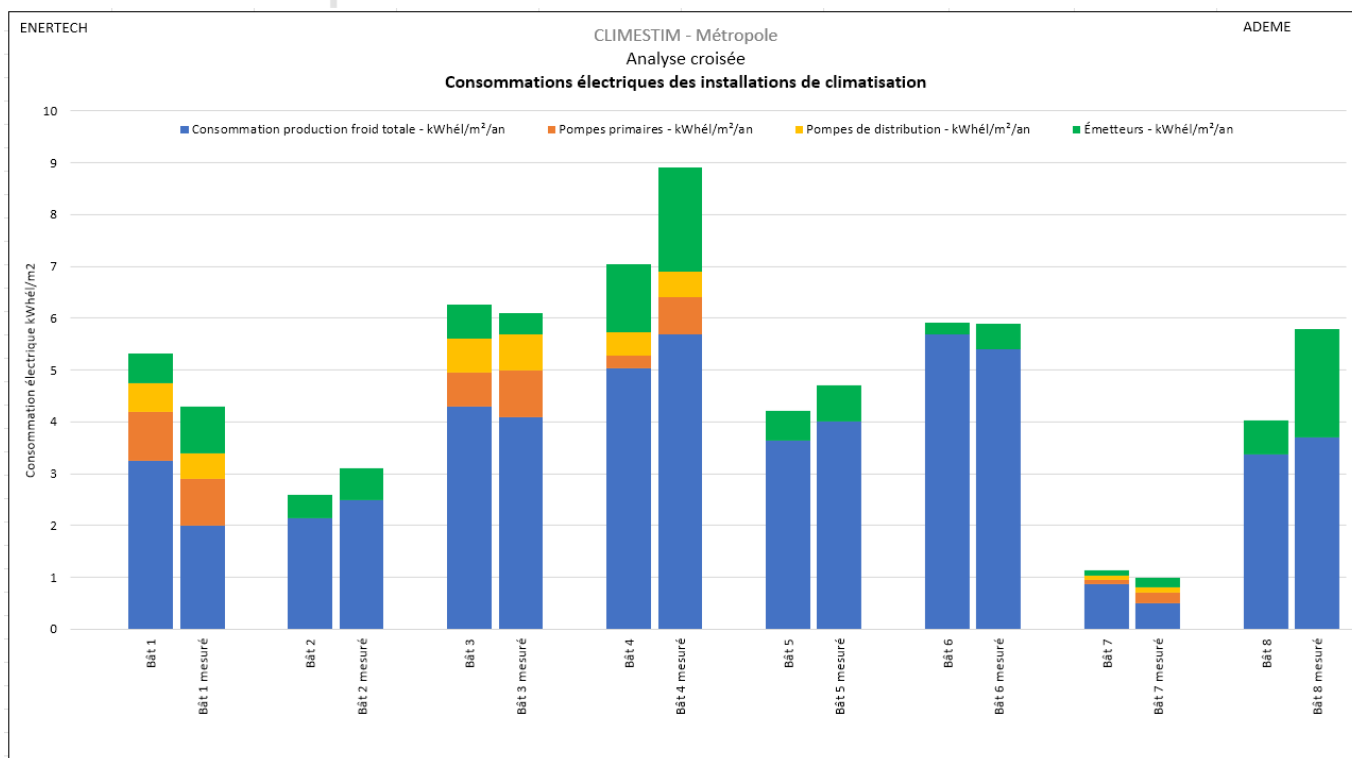


Figure 7 : Comparaison calcul/mesure sur la consommation électrique des installations de climatisation

De même, la consommation électrique est plutôt bien estimée par l'outil. On a des écarts significatifs sur certains postes, par exemple les émetteurs (ventilo-convecteurs) du Bât 5, ou les pompes primaires du Bât 6 : ces écarts sont dus à des consommations anormalement élevées sur ces postes que l'outil ne peut pas reproduire, à cause d'un fort surdimensionnement des pompes primaires pour Bât 6, et de ventilo-convecteurs ayant une consommation de veille anormale pour Bât 5. Bât 5 est également un petit bâtiment (111m²), donc le travail au m² est beaucoup plus sensible.

Les principales hypothèses utilisées pour les paramétrages de l'outil pour les 8 sites sont regroupées dans l'Annexe 2. Elles ont de manière générale été relevées/mesurées sur site.

b. Tests sur d'autres bâtiments mesurés par Enertech dans le cadre d'autres projets

Un test a pu être fait sur un autre bâtiment mesuré par Enertech, le Bât 9 à Marseille. C'est un test intéressant car c'est le bâtiment avec la plus forte consommation de climatisation mesurée à ce jour par Enertech, et on constate que l'outil arrive bien à reproduire cette consommation, qui est pourtant un cas assez extrême :

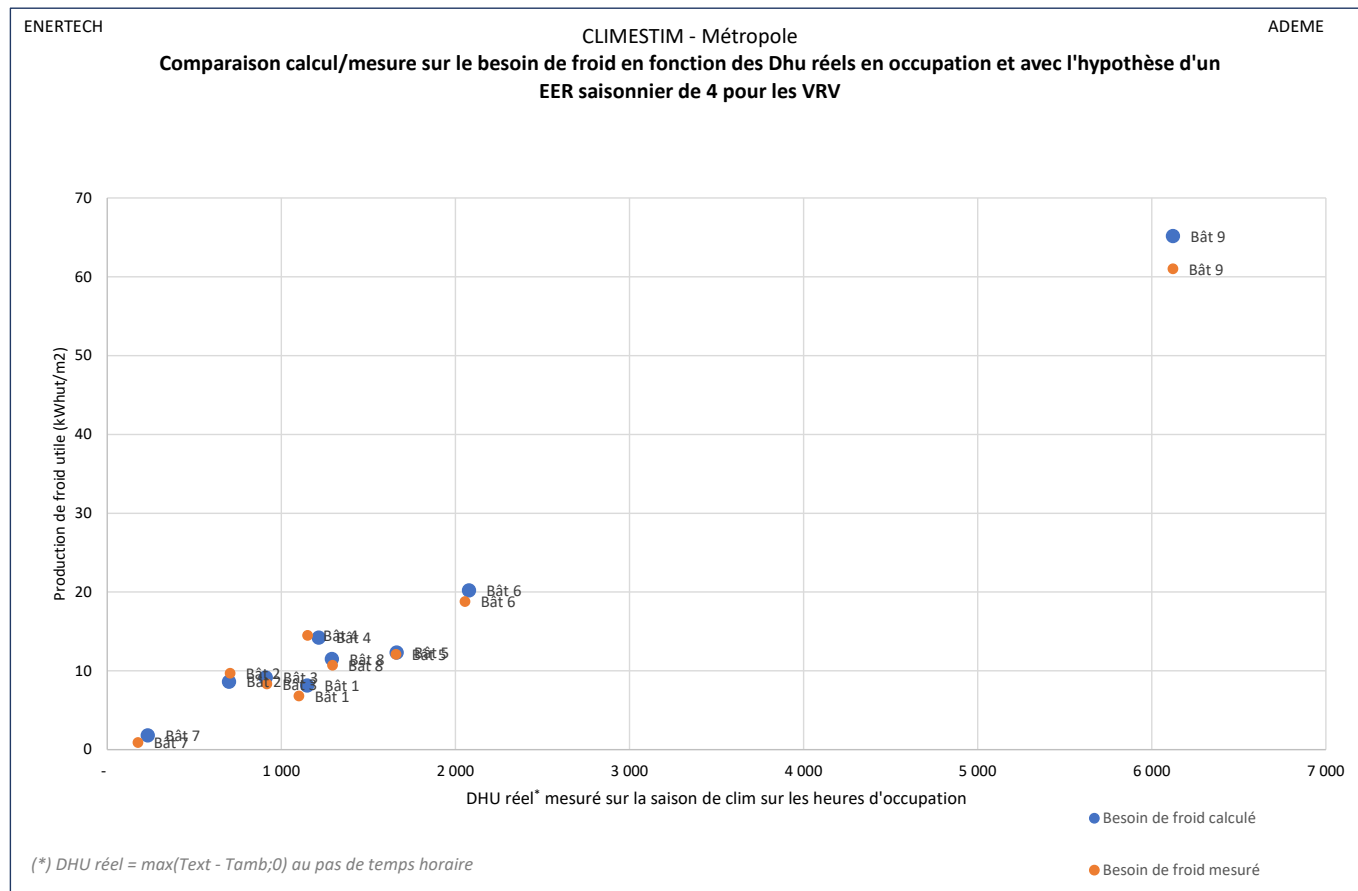


Figure 8 : Comparaison calcul/mesure sur la consommation électrique des installations de climatisation

Les DHU sont également très élevés car la température de consigne du bâtiment est de 24°C en occupation et en inoccupation, nettement inférieure aux autres bâtiments mesurés.

Pour les autres bâtiments mesurés par Enertech que nous avons voulu tester sur l'outil, nous avons manqué d'informations pour avoir une saisie suffisamment fine pour pouvoir comparer le calcul et la mesure (surface climatisée, température de consigne, caractéristiques de l'installation de climatisation, etc.). Ce travail est à poursuivre pour affiner et valider l'outil.

IV. SUITES A DONNER

A ce stade, l'outil rendu (1 version Réunion et 1 version Métropole) est fonctionnel mais n'a pas été formellement validé sur des bâtiments extérieurs au projet.

Les grandes lignes d'une stratégie de validation et de diffusion de l'outil sont proposées dans le livrable P5.5. La validation ne peut objectivement se faire que sur la base de données de mesure sur des bâtiments réels mais la question centrale est d'obtenir des données de mesure sur des bâtiments réels sur une année complète (ou au moins une période assez longue).

De la même manière, concernant l'aide à l'utilisation de l'outil, différentes stratégies sont possibles (allant d'un simple guide à des formations dédiées). Quoi qu'il en soit, **la valorisation de l'outil devra faire l'objet d'un projet complémentaire si l'intérêt pour l'outil est confirmé**. En effet, le projet CLIMESTIM s'arrêterait à la mise à disposition d'un outil fonctionnel comme précisé dans notre offre.

Il serait également pertinent de transposer l'outil réalisé pour La Réunion aux autres DOM, qui ont aussi des climats tropicaux chauds et humides et dans lesquels le recours à la climatisation est souvent important. Des éléments pour une potentielle transposition aux autres DOM sont présentés dans le livrable 5.6 : **ce volet pourrait faire l'objet d'un projet dans le cadre d'un futur AAP OMBREE** sur la construction durable en Outre-mer.

ANNEXE 1 : RAPPORT STD

1. Présentation des bâtiments étudiés

Chaque bâtiment est présenté par une fiche d'identité détaillant les points suivants :

- Photographies aériennes
- Adresse
- Coordonnées
- Classification de Köppen
- Données météorologiques
- Activité
- Surface de plancher
- Surface climatisée
- Nombre de bâtiments
- Nombre de niveaux

Les sources sont :

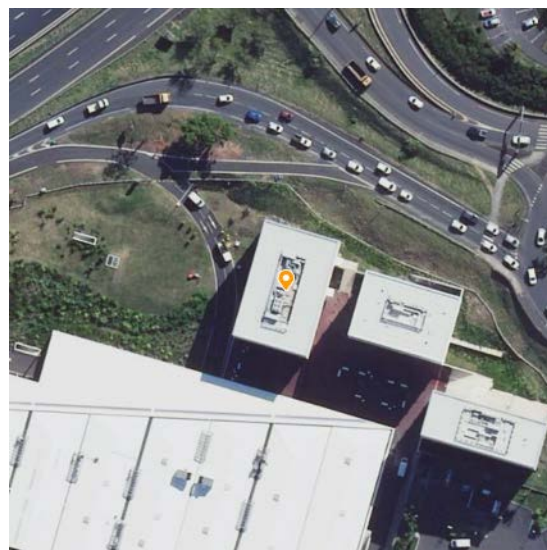
- <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>
- <https://koppen.earth/>
- <https://www.climate.onebuilding.org/>

a. La Réunion

GEG1



Echelle 1 : 1 000 000



Echelle 1 : 2 000

Région : La Réunion
Département : 974 La Réunion
Commune : 97410 Saint-Pierre

Parcelle : 000 DO 0273

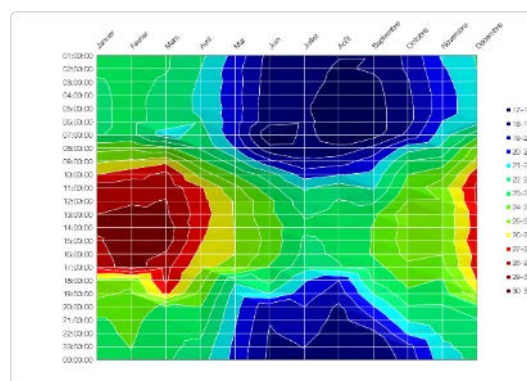
Coordonnées : -21.3302 , 55.4715
Altitude : 60 m



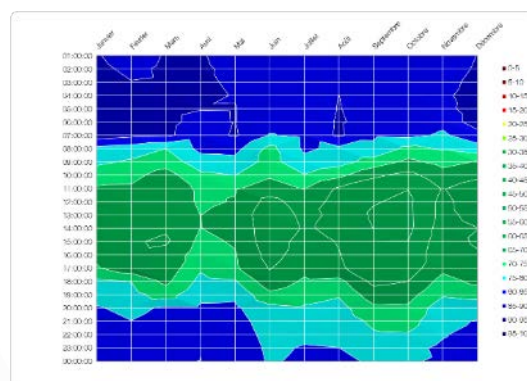
Climat de type savane avec hiver sec (Aw) :

Température moyenne mensuelle > 18 °C

Précipitations du mois hivernal le plus sec < 60 mm et < 100 –
(précipitations annuelles moyennes/25)



Carte de chaleur de la température



Carte de chaleur de l'humidité relative

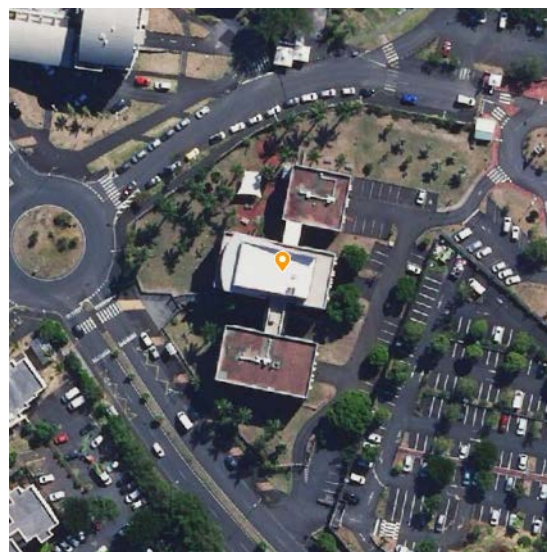
Activité : ERP / Bureaux
Surface de plancher : 3 631 m²
Surface climatisée : 2 988 m²
Nombre de bâtiments : 1
Nombre de niveaux : 6

GEG2



Echelle 1 : 1 000 000

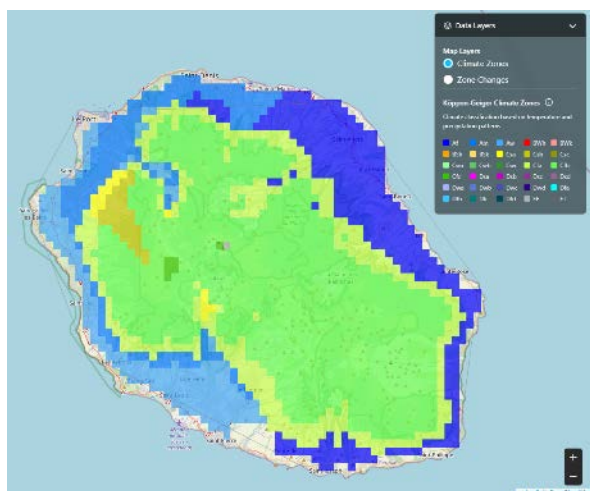
Région : La Réunion
Département : 974 La Réunion
Commune : 97490 Saint-Denis



Echelle 1 : 2 000

Parcelle : 000 HK 0199

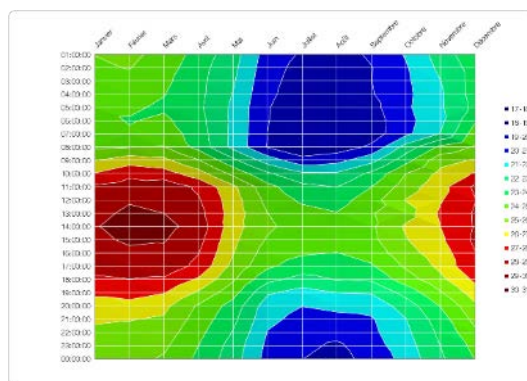
Coordonnées : -20.9027 , 55.4815
Altitude : 98 m



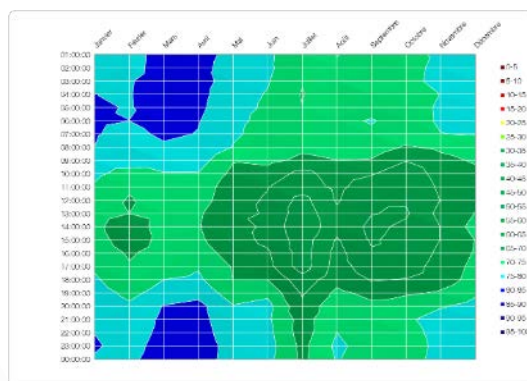
Climat de type savane avec hiver sec (Aw) :

Température moyenne mensuelle > 18 °C

Précipitations du mois hivernal le plus sec < 60 mm et < 100 –
(précipitations annuelles moyennes/25)



Carte de chaleur de la température



Carte de chaleur de l'humidité relative

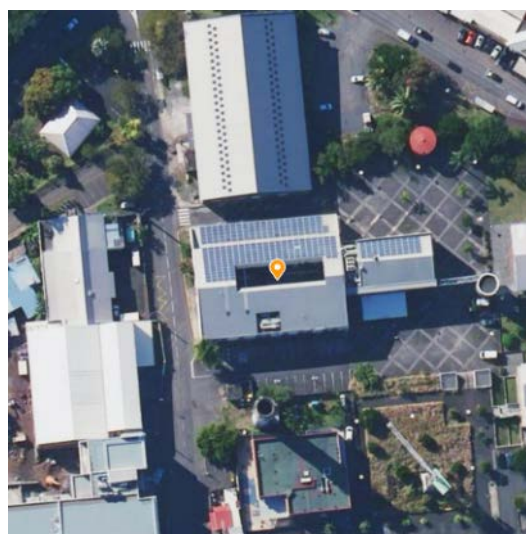
Activité : ERP / Bureaux
Surface de plancher : 3 079 m²
Surface climatisée : 1 977 m²
Nombre de bâtiments : 3
Nombre de niveaux : 4

GEG3



Echelle 1 : 1 000 000

Région : La Réunion
Département : 974 La Réunion
Commune : 97438 Sainte-Marie



Echelle 1 : 2 000

Parcelle : 000 AC 1230

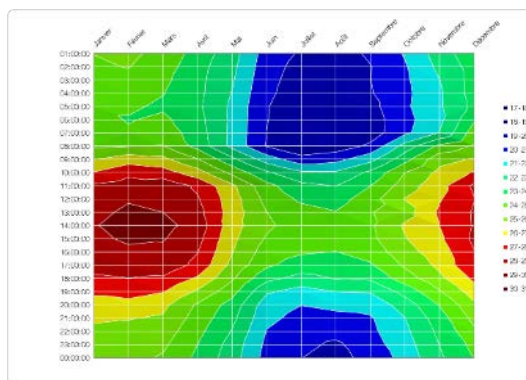
Coordonnées : -20.8941 , 55.5331
Altitude : 10 m



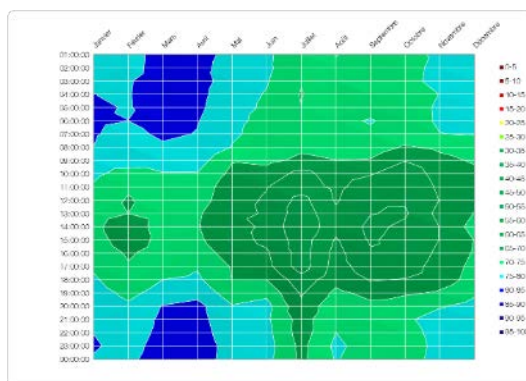
Climat de type savane avec hiver sec (Aw) :

Température moyenne mensuelle > 18 °C

Précipitations du mois hivernal le plus sec < 60 mm et < 100 –
(précipitations annuelles moyennes/25)



Carte de chaleur de la température



Carte de chaleur de l'humidité relative

Activité : ERP / Bureaux
Surface de plancher : 4 537 m²
Surface climatisée : 3 002 m²
Nombre de bâtiments : 2
Nombre de niveaux : 5

GEG4



Echelle 1 : 1 000 000

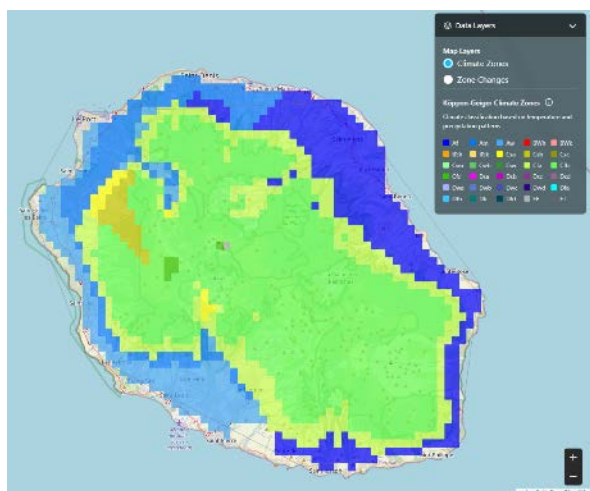
Région : La Réunion
Département : 974 La Réunion
Commune : 97490 Saint-Denis



Echelle 1 : 2 000

Parcelle : 000 BP 0587

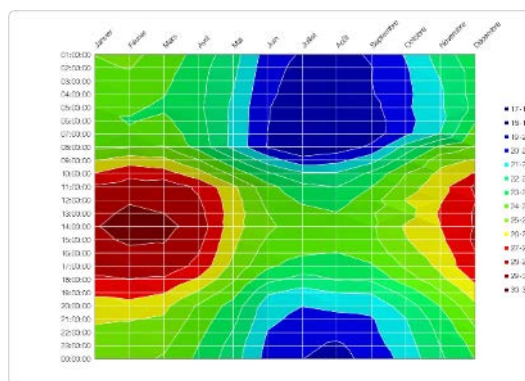
Coordonnées : -20.9036 , 55.5018
Altitude : 72 m



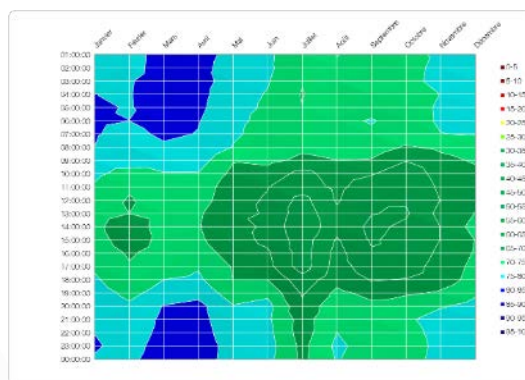
Climat de type savane avec hiver sec (Aw) :

Température moyenne mensuelle > 18 °C

Précipitations du mois hivernal le plus sec < 60 mm et < 100 –
(précipitations annuelles moyennes/25)



Carte de chaleur de la température

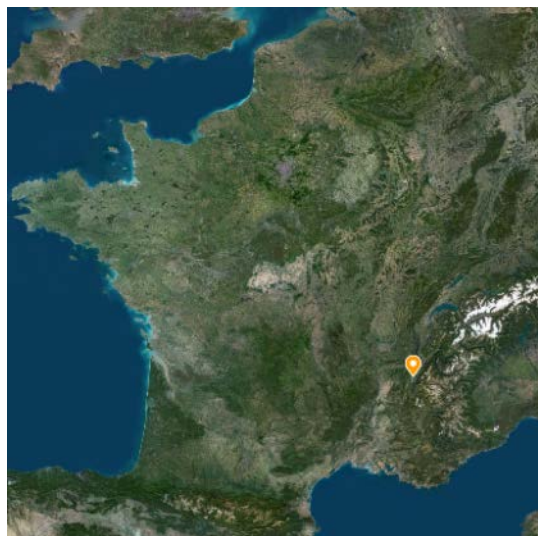


Carte de chaleur de l'humidité relative

Activité : ERP / Bureaux
Surface de plancher : 1 584 m²
Surface climatisée : 655 m²
Nombre de bâtiments : 1
Nombre de niveaux : 3

b. France métropolitaine

Bât 2



Echelle 1 : 14 000 000



Echelle 1 : 2 000

Région : Auvergne-Rhône-Alpes

Département : 38 Isère

Commune : 38100 Grenoble

Parcelle : 000 EI 0053

Coordonnées : 45.1712 , 5.7328

Altitude : 216 m



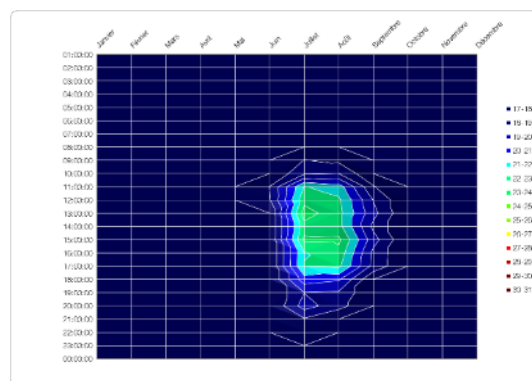
Climat de type océanique (Cfb) :

Température moyenne du mois le plus froid > -3 °C et < 18 °C

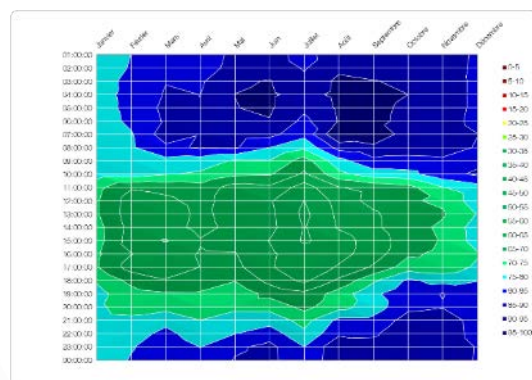
Température moyenne du mois le plus chaud > 10 °C et < 22 °C

Températures moyennes des 4 mois les plus chauds > 10 °C

Pas de saison sèche



Carte de chaleur de la température



Carte de chaleur de l'humidité relative

Activité : ERP / Bureaux

Surface de plancher : 11 889 m²

Surface climatisée : 8 239 m²

Nombre de bâtiments : 2

Nombre de niveaux : 5

Bât 3



Echelle 1 : 14 000 000



Echelle 1 : 2 000

Région : Nouvelle-Aquitaine
Département : 17 Charente-Maritime
Commune : 17000 La Rochelle

Parcelle : 000 HO 0025

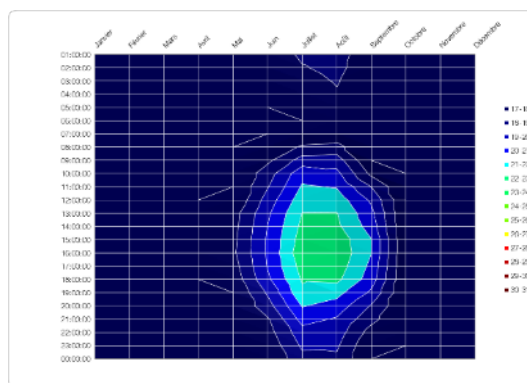
Coordonnées : 46.1378 , -1.1517
Altitude : 6 m



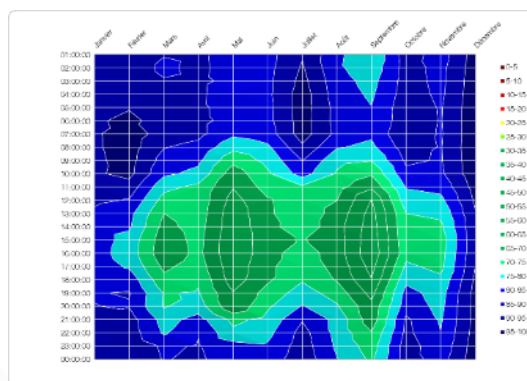
Climat de type méditerranéen (Csb) :

Température moyenne du mois le plus froid > -3 °C et < 18 °C
Température moyenne du mois le plus chaud > 10 °C et < 22 °C
Températures moyennes des 4 mois les plus chauds > 10 °C

Précipitations du mois estival le plus sec < 40 mm et < 1/3 du mois hivernal le plus humide



Carte de chaleur de la température



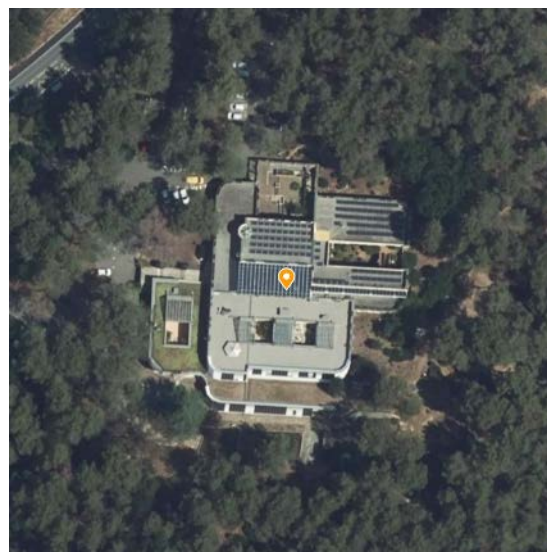
Carte de chaleur de l'humidité relative

Activité : ERP / Bureaux
Surface de plancher : -
Surface climatisée : -
Nombre de bâtiments : 1
Nombre de niveaux : 5

Bât 4



Echelle 1 : 14 000 000



Echelle 1 : 2 000

Région : Provence-Alpes-Côte d'Azur
Département : 06 Alpes-Maritimes
Commune : 06560 Valbonne

Parcelle : 000 AN 0030

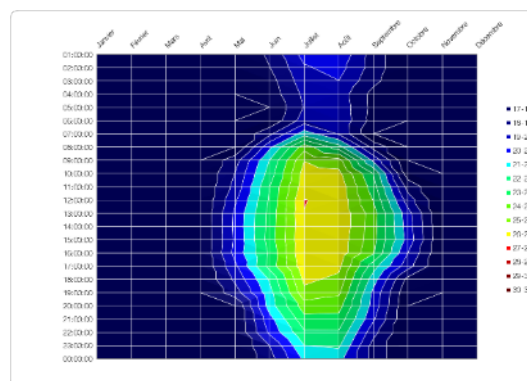
Coordonnées : 43.6159 , 7.0505
Altitude : 175 m



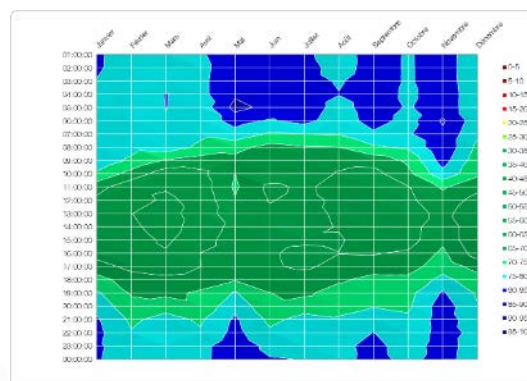
Climat de type méditerranéen (Csa) :

Température moyenne du mois le plus froid > -3 °C et < 18 °C
Température moyenne du mois le plus chaud > 22 °C

Précipitations du mois estival le plus sec < 40 mm et < 1/3 du mois
hivernal le plus humide



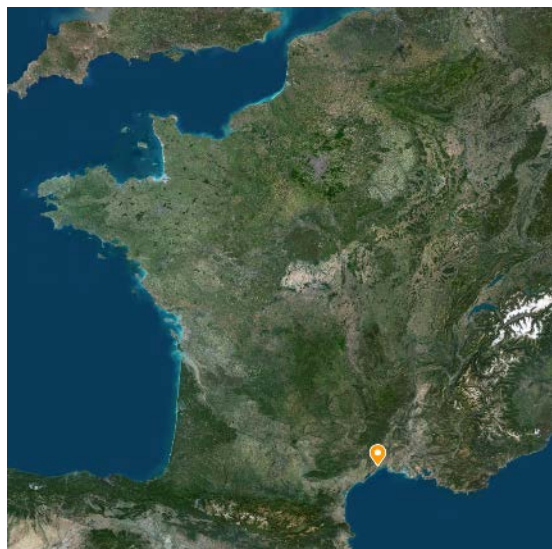
Carte de chaleur de la température



Carte de chaleur de l'humidité relative

Activité : ERP / Bureaux
Surface de plancher : 3 559 m²
Surface climatisée : 2 418 m²
Nombre de bâtiments : 2
Nombre de niveaux : 3

Bât 6



Echelle 1 : 14 000 000

Région : Occitanie
Département : 34 Hérault
Commune : 34070 Montpellier



Echelle 1 : 2 000

Parcelle : 000 OB 0026

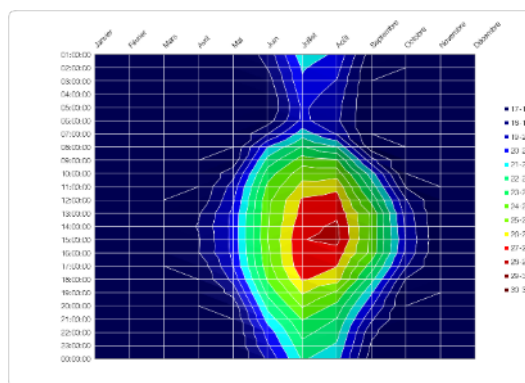
Coordonnées : 43.5722 , 3.8584
Altitude : 15 m



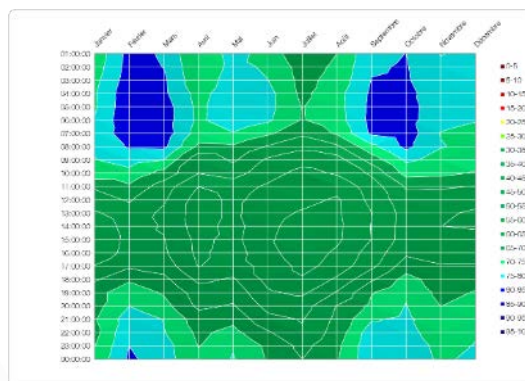
Climat de type méditerranéen (Csa) :

Température moyenne du mois le plus froid > -3 °C et < 18 °C
Température moyenne du mois le plus chaud > 22 °C

Précipitations du mois estival le plus sec < 40 mm et < 1/3 du mois hivernal le plus humide



Carte de chaleur de la température



Carte de chaleur de l'humidité relative

Activité : ERP / Bureaux
Surface de plancher : 1 272 m²
Surface climatisée : 881 m²
Nombre de bâtiments : 2
Nombre de niveaux : 2

2. STD

a. Méthodologie

L'étude de simulation thermique dynamique est réalisée grâce aux outils :

- Rhino3D (modélisation thermique), Grasshopper (programmation visuelle) et Honeybee (plug-in utilisant OpenStudio et EnergyPlus) d'une part ;
- SketchUp (modélisation thermique), Euclid (plug-in permettant d'éditer la géométrie EnergyPlus dans SketchUp), IDF Editor (interface graphique) et Elements (outil de création de fichier météo personnalisé) d'autre part.



Le programme de simulation énergétique EnergyPlus permet de modéliser la consommation d'énergie et la consommation d'eau pour l'ensemble du bâtiment.

La simulation thermique dynamique, ou STD, permet, par le biais d'outils informatiques, de calculer l'évolution temporelle de l'état thermique d'un système en utilisant un modèle numérique proche du système réel.

Dans notre cas d'étude, la STD permettra d'estimer les besoins frigorifiques **en tenant compte de l'enveloppe du bâtiment, des équipements, du comportement des usagers et de la météo.**

Les bâtiments, les menuiseries extérieures et les protections solaires sont modélisés, dans un premier temps, sur Rhino3D. Ensuite, la géométrie est convertie en zones thermiques par le plug-in Honeybee dans Grasshopper, puis exportée en IDF. Cette méthode permet de profiter de la puissance de modélisation de Rhino3D avec ses calques et ses nombreux outils de dessin. La force du plug-in réside aussi dans sa facilité à réaliser une correspondance de surface sans erreurs. A partir du fichier IDF, nous ajoutons nos hypothèses dans IDF Editor et identifions les éléments de constructions sur SketchUp via le plug-in Euclid. Le modèle étant désormais prêt, la dernière étape consiste à créer un fichier météo adapté au calibrage de notre bâtiment sur Elements. Ainsi, nous utilisons les données météorologiques les plus fiables et les plus récentes (c'est-à-dire celles des données mesurées sur site, si existantes, ou de la station météo la plus proche [en altimétrie puis en distance] sur la période de mesure) ; en général, les données libres d'accès de Météo France.

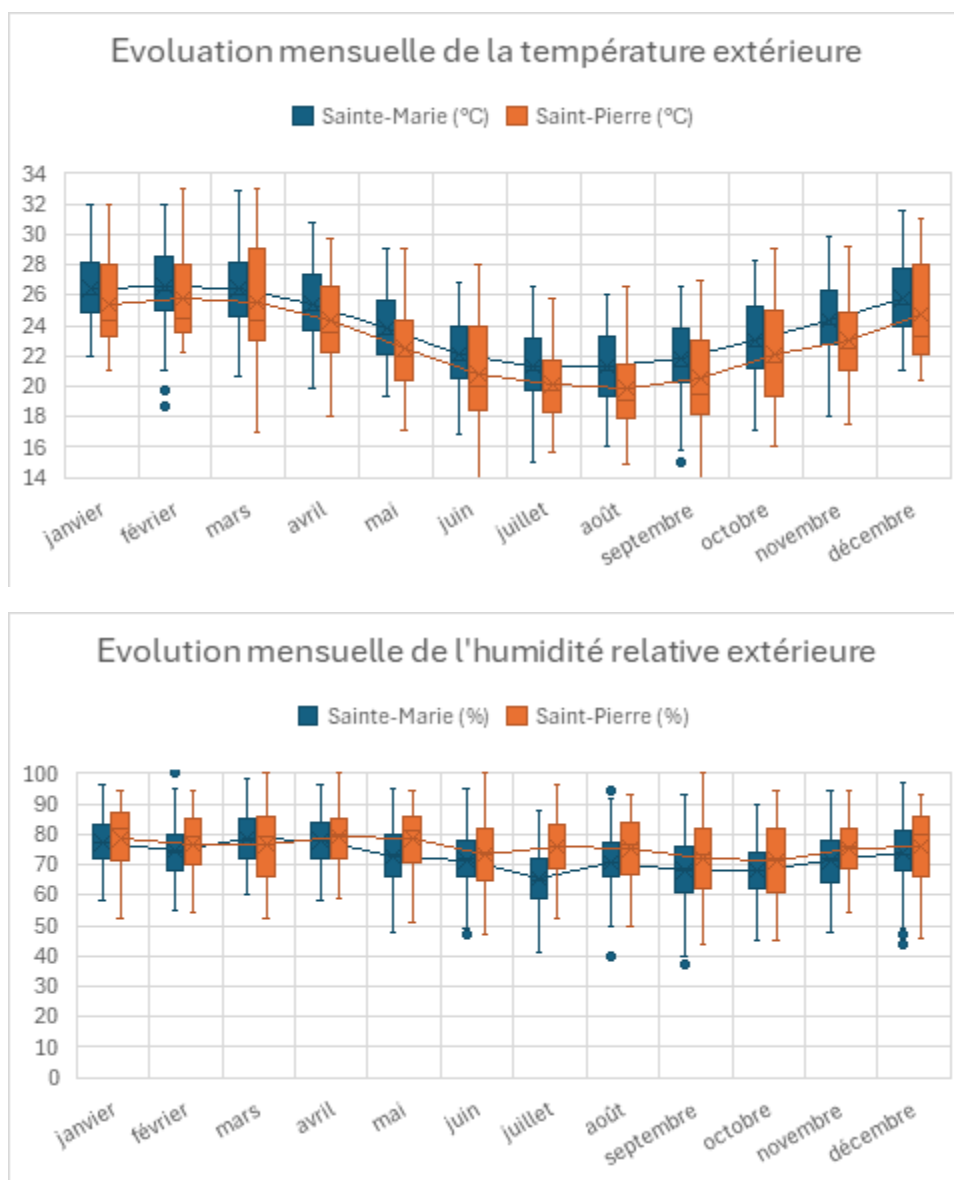
b. Données météorologiques

La Réunion

Les données météorologiques typiques proviennent de :

- la commune de **Saint-Pierre** ;
- la commune de **Sainte-Marie**.

La source des données est <https://www.climate.onebuilding.org/>



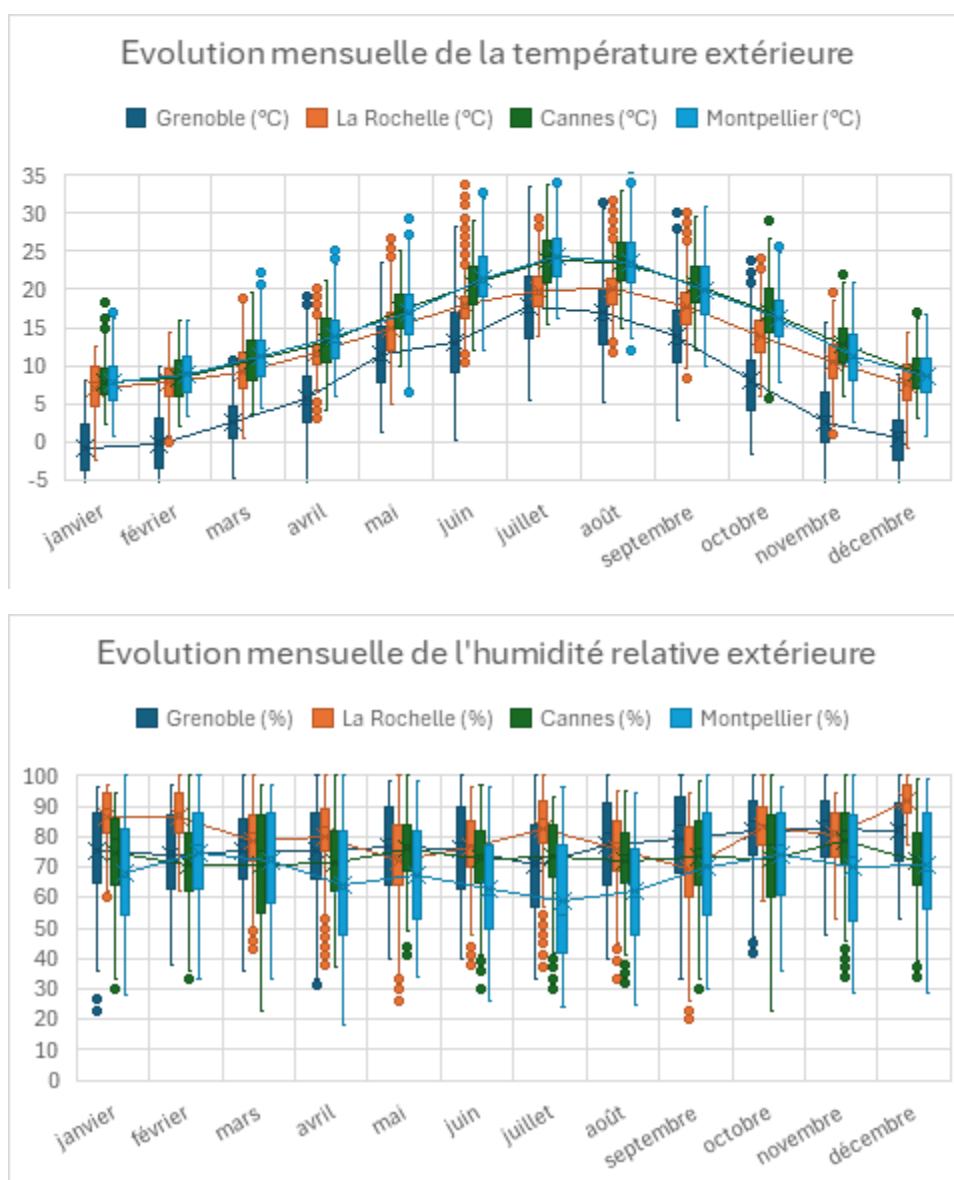
La température moyenne de Sainte-Marie et Saint-Pierre sont respectivement de 24.0 °C et 22.9 °C, soit un écart de 1.1 °C.

France métropolitaine

Les données météorologiques typiques proviennent de :

- la commune de **Grenoble** ;
- la commune de **La Rochelle** ;
- la commune de **Cannes pour Valbonne** ;
- la commune de **Montpellier**.

La source des données est <https://www.climate.onebuilding.org/>



La température moyenne de Grenoble, La Rochelle, Cannes et Montpellier sont respectivement de 7.6 °C, 13.2 °C, 15.4 °C et 15.3 °C, soit un écart maximal de 7.7 °C.

c. Hypothèses

La Réunion

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Fichier météo	St Pierre	Moufia	ARRG	ARRG
Simulation	Du 09/02/2023 Au 08/02/2024	Du 01/12/2022 Au 30/06/2023	Du 01/06/2024 Au 31/05/2025	Du 01/11/2024 Au 31/05/2025
Jours spéciaux	Jours fériés Samedi Dimanche	Jours fériés Vacances Dimanche	Jours fériés Dimanche	Jours fériés Fermeture annuelle Dimanche
Albédo	0.2	0.2	0.2	0.2
Isolation de toiture	8 cm	5 cm	8 cm	8 cm
Couleur de toiture ⁴	0.977 – noir	0.977 – noir	0.712 – gris	0.977 – noir
Isolation de façade	0.1 cm	0.1 cm	0.1 cm	0.1 cm
Couleur de façade ⁴	0.282 – blanc	0.712 – rouge foncé	0.282 – blanc	0.282 – blanc
Protection solaire	Voir modèle	Voir modèle	Aucun	Aucun
Occupants	10 m ² /pers	10 m ² /pers	10 m ² /pers	10 m ² /pers
Eclairage	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²
Equipements	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²
Infiltration	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²
Ventilation mécanique	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers	éteint	25 m ³ /h.pers
Temp. de consigne	26 °C	26 °C	26 °C	27.5 °C
Planning CVC	De 6h à 17h	De 6h à 18h	De 7h à 18h	De 7h à 18h

France métropolitaine

	Bât 2 Grenoble	Bât 3 La Rochelle	Bât 4 Valbonne	Bât 6 Montpellier
Fichier météo	CAIPOS	-	Valbonne-Sophia	Villeneuve-lès-Maguelone
Simulation	Du 01/07/2022 Au 14/09/2022	-	Du 17/05/2023 Au 30/09/2023	Du 21/05/2024 Au 06/10/2024
Jours spéciaux	Jours fériés Samedi Dimanche	-	Jours fériés Dimanche	Jours fériés Dimanche
Albédo	0.2	-	0.2	0.2
Isolation de toiture	10 cm	-	10 cm	10 cm
Couleur de toiture ⁴	0.977 – noir	-	0.712 – gris	0.712 – gris
Isolation de façade	2 cm	-	5 cm	5 cm
Couleur de façade ⁴	0.282 – blanc	-	0.712 – gris	0.434 – ivoire
Protection solaire	Voir modèle	-	Aucun	Aucun
Occupants	10 m ² /pers	-	25 m ² /pers	10 m ² /pers
Eclairage	5 W/m ²	-	3 W/m ²	5 W/m ²
Equipements	10 W/m ²	-	7 W/m ²	10 W/m ²
Infiltration	1.08 m ³ /h.m ²	-	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²
Ventilation mécanique	25 m ³ /h.pers	-	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers
Temp. de consigne	28 °C	-	26 °C	28 °C
Planning CVC	De 7h à 19h	-	De 6h à 20h	De 10h à 18h

⁴ Source des coefficients absorption solaire retenus :

https://www.researchgate.net/publication/280041642_Determination_of_the_solar_absorptance_of_opaque_surfaces

CLIMESTIM – Un outil simplifié et opérationnel pour estimer les consommations de climatisation des bâtiments tertiaires à La Réunion et en métropole – AAP ADEME « Bâtiments responsables » 2022

d. Modèles thermiques

La Réunion

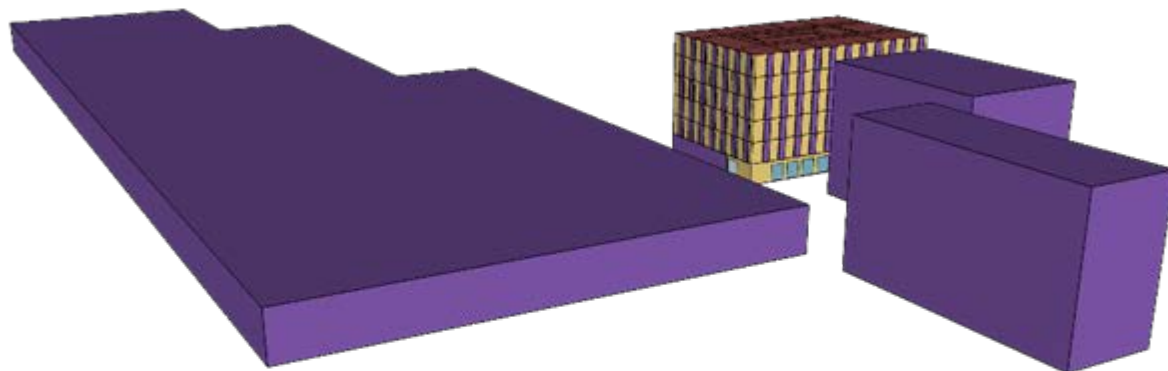


Figure 9 : Modèle thermique GEG1

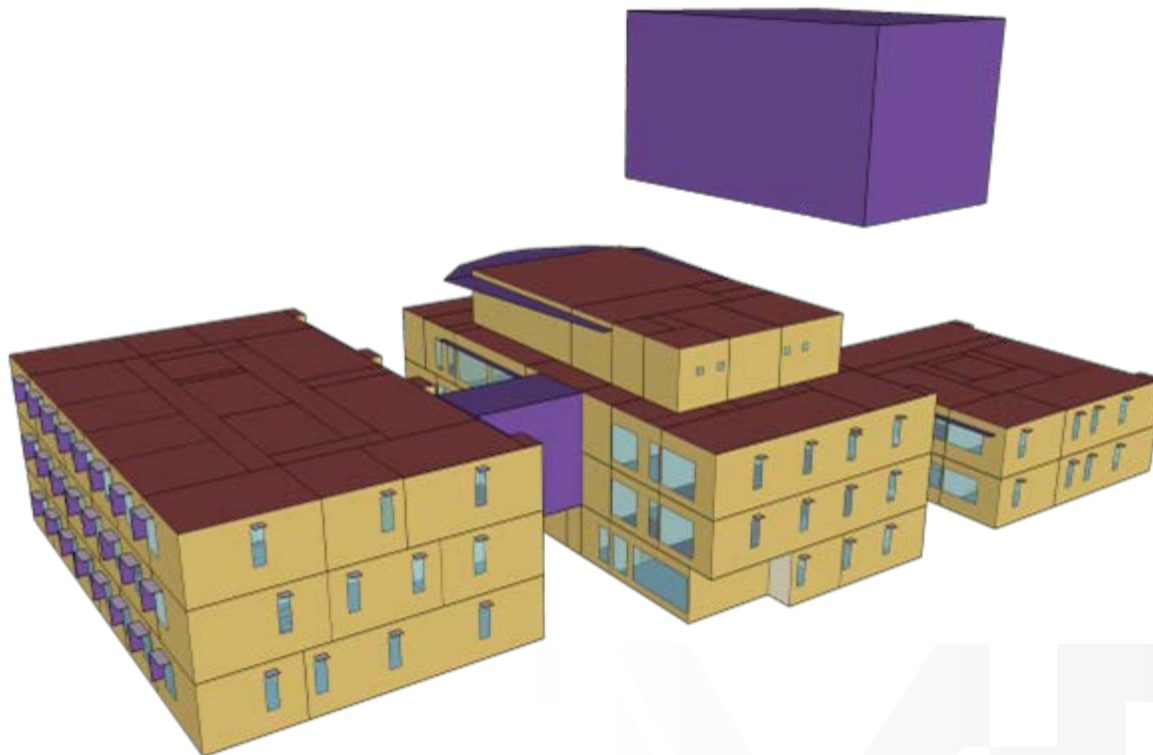


Figure 10 : Modèle thermique GEG2

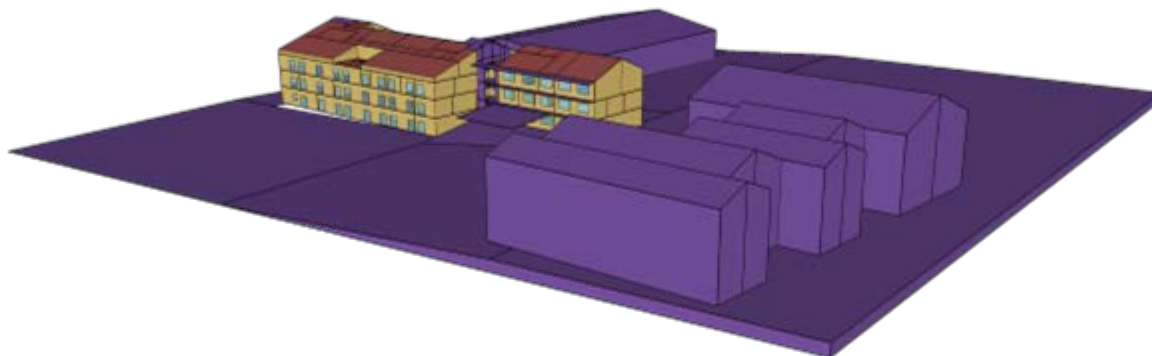


Figure 11 : Modèle thermique GEG3

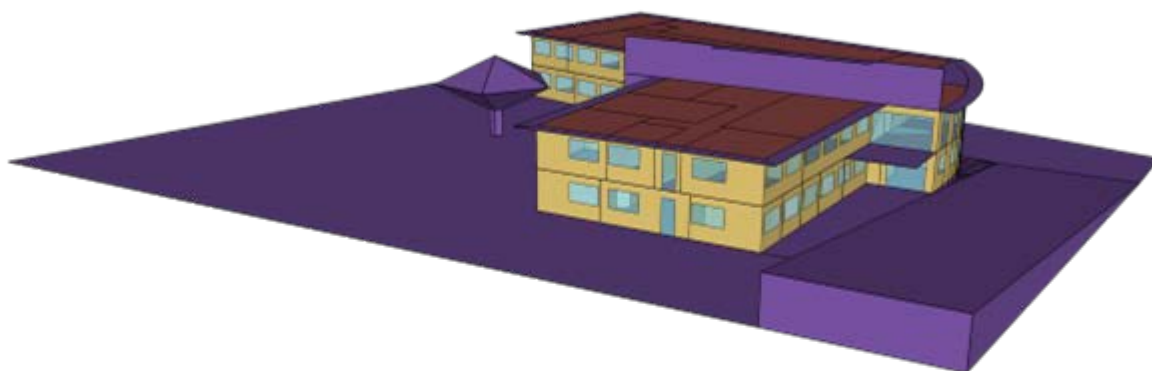


Figure 12 : Modèle thermique GEG4

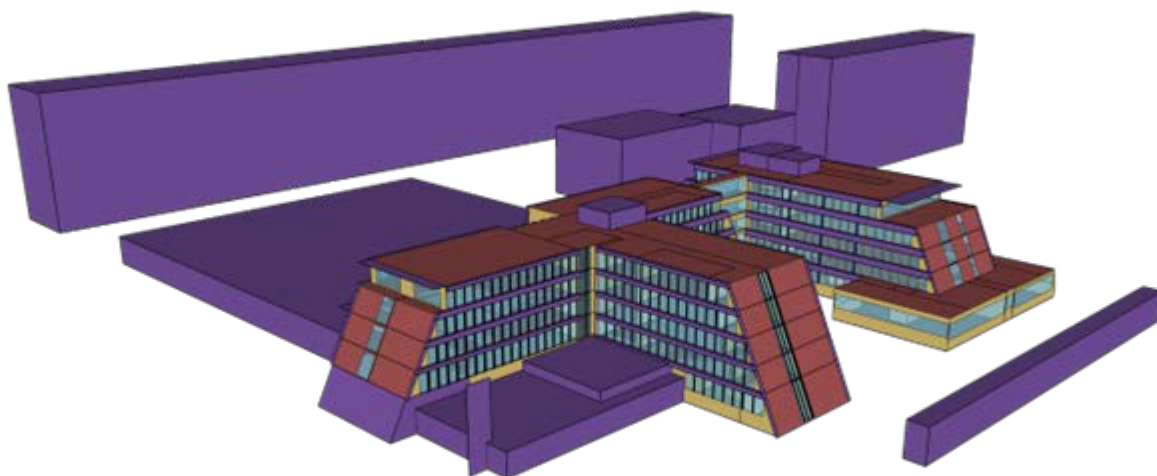


Figure 13 : Modèle thermique de Bât 2

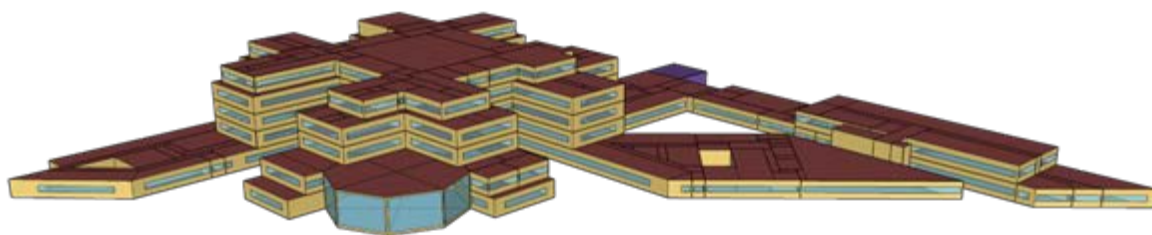


Figure 14 : Modèle thermique de Bât 3

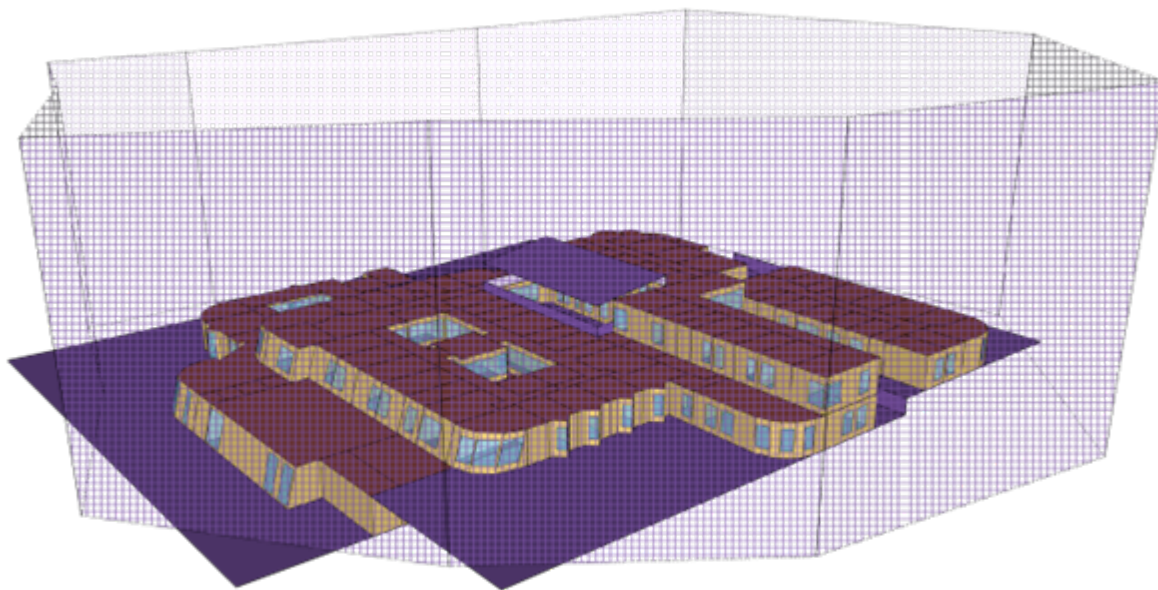


Figure 15 : Modèle thermique de Bât 4

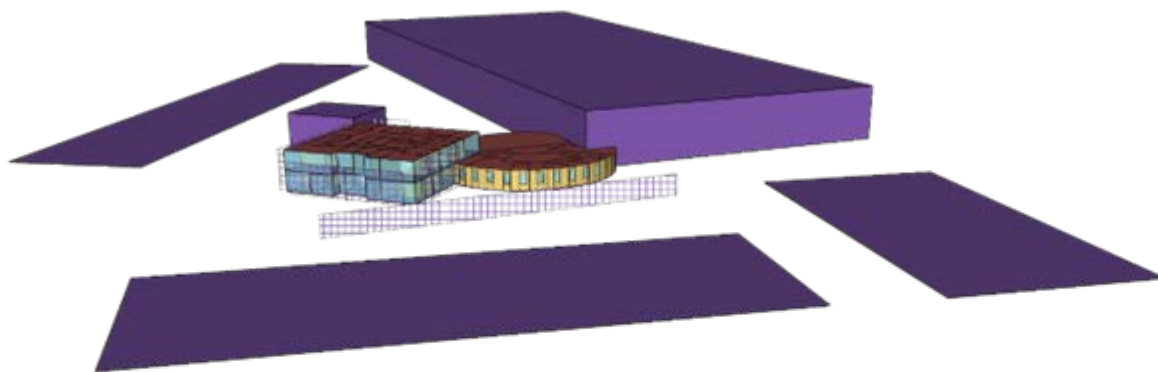


Figure 16 : Modèle thermique de Bât 6

e. Calibrage et validation

Le calibrage consiste à modifier itérativement les paramètres d'entrée jusqu'à ce que les résultats de la simulation soient proche des données mesurées. Le calibrage ne donne pas une solution unique car plusieurs combinaisons de paramètres peuvent donner le même résultat. Il est donc du ressort du concepteur de proposer la combinaison la plus réaliste.

Les métriques utilisées et préconisées par d'autres chercheurs sont :

- L'erreur moyenne normalisé (NMBE⁵) qui permet de normaliser le biais moyen afin de comparer différentes valeurs entre elles. Une valeur négative signifie que le modèle surestime les données réelles. Cette métrique doit tendre vers 0.

$$NMBE = \frac{1}{\bar{m}} * \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n - p} * 100(\%)$$

- Le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV(RMSE)⁶) qui mesure la variation des erreurs entre résultats simulés et données mesurées. Cette métrique doit être le plus faible possible.

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n - p}} * 100(\%)$$

- Le coefficient de détermination R² qui détermine l'incertitude d'une simulation par rapport aux données mesurées. Cette métrique doit tendre vers 1.

$$R^2 = \left(\frac{n * \sum_{i=1}^n (m_i * s_i) - \sum_{i=1}^n (m_i) * \sum_{i=1}^n (s_i)}{\sqrt{(n * \sum_{i=1}^n (m_i^2) - (\sum_{i=1}^n (m_i))^2) * (n * \sum_{i=1}^n (s_i^2) - (\sum_{i=1}^n (s_i))^2)}} \right)^2$$

Avec m_i et s_i les valeurs mesurées et simulées à l'instant i (avec $i = 1, \dots, n$), n le nombre de données, p le nombre de paramètres ajustables pris égal à 0 dans notre cas et \bar{m} la moyenne des valeurs mesurées.

Les valeurs acceptables de ces métriques sont données par les ASHRAE Guideline 14-2014, le FEMP et l'IPMVP. Les valeurs diffèrent en fonction du pas de temps : horaire ou mensuel. Le modèle est considéré calibré lorsque la valeur absolue de NMBE et CV(RMSE) sont inférieurs à 10 % et 30 % avec des données horaires, ou 5 % et 15 % avec des données mensuelles.

Tableau 17 : Critères pour le calibrage

	NMBE (%)	CV(RMSE) (%)	R ²
Horaire	± 10 %	< 30 %	> 0.75
Mensuel	± 5 %	< 15 %	> 0.75

⁵ Normalized Mean Bias Error

⁶ Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error

Le calibrage est réalisé en prenant en compte uniquement la chaleur sensible. En effet, sur EnergyPlus, le système est régulé de manière à couvrir la chaleur sensible mais la chaleur latente est calculée à partir de la valeur du ratio de chaleur sensible (RCS), où $RCS = \text{chaleur sensible} / \text{chaleur totale (sensible + latente)}$; la valeur par défaut étant 0.7. Ainsi, les données mesurées (couvrant la chaleur totale) ont été multipliées par cette valeur par défaut afin d'avoir uniquement les données couvrant la chaleur sensible. Ce ratio de chaleur sensible faisait partie des paramètres ajustables du calibrage. Il a été modifié à 0.8 uniquement dans le cas où la ventilation mécanique était éteinte pour prendre en compte le fait qu'il y ait moins de chaleur latente à évacuer par le système ; l'air extérieur étant plus humide que l'air intérieur.

La première étape du calibrage consiste à modéliser le bâtiment avec les informations obtenues auprès du maître d'ouvrage. Les plans, les fiches techniques des matériaux et les fiches techniques des systèmes fournis par les fabricants doivent également être pris en compte afin de décrire précisément le modèle. Habituellement, il est impossible d'avoir accès à toutes les données et certaines hypothèses sont émises sur certains paramètres. C'est le cas, par exemple, des apports internes et de l'étanchéité du bâtiment.

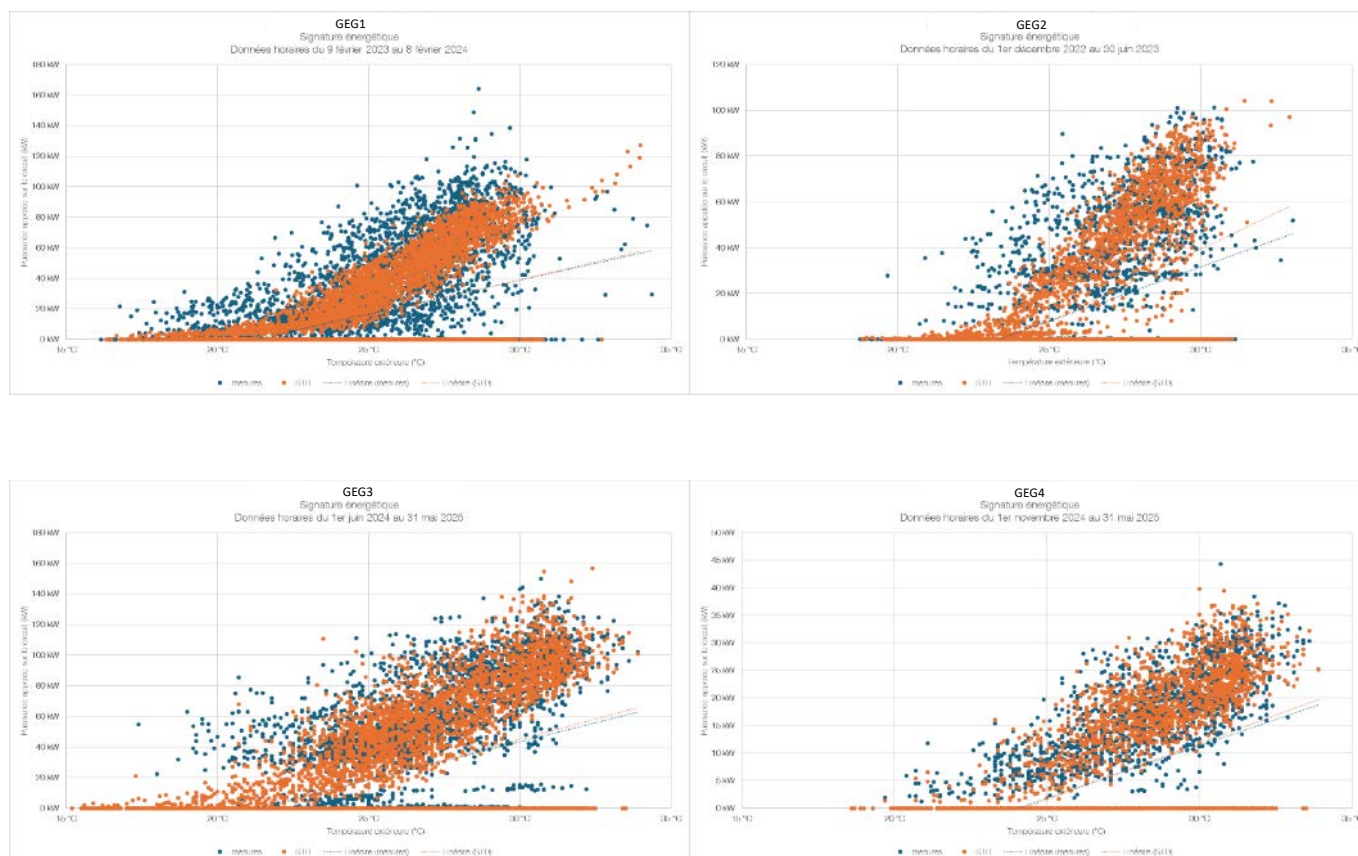
Par la suite, le modèle peut manquer de précision. Ainsi, nous comparons les données mesurées et simulées en calculant les métriques, présentées précédemment, à chaque ajustement d'un paramètre jusqu'à obtenir notre modèle validé. Les paramètres modifiés sont généralement les masques solaires et l'inertie thermique. Il est aussi possible d'ajuster la température de consigne ou les apports internes si ces données sont manquantes ou imprécises.

La Réunion

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Mesuré (MWh)	124.73	36.52	166.17	27.70
Simulé (MWh)	113.84	35.71	167.25	27.80
NMBE (%)	9	1	-1	0
CV(RMSE) (%)	95	103	82	66
R ²	0.74	0.71	0.79	0.86

Le calibrage s’est fait avec des données horaires sur toute la période de mesure. Cela induit des valeurs de CV(RMSE) élevée du fait de l’imprécision du modèle sur une période aussi longue. En effet, le système CVC est modélisé de façon simplifiée et ne donne que les besoins frigorifiques permettant de combattre les apports de chaleur. Ainsi, les consommations résiduelles mesurées et les pertes thermiques liées au groupe, à la pompe de distribution et aux ventilo-convecteurs provoquent des écarts importants avec les points de données.

La signature énergétique permet d’apprécier la dispersion des données horaires.

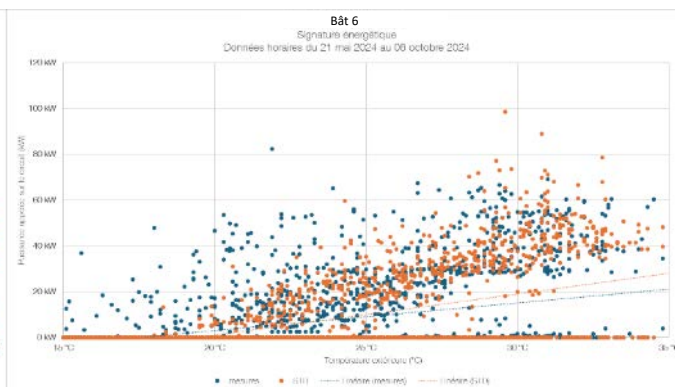
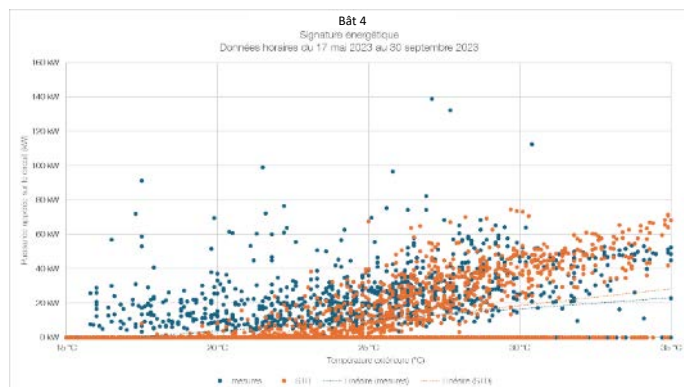
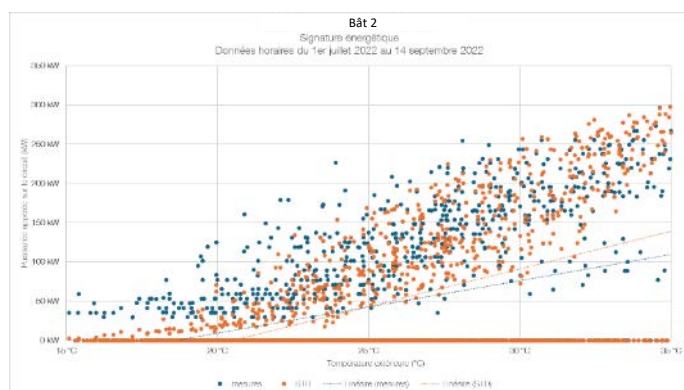


France métropolitaine

	Bât 2 Grenoble	Bât 3 La Rochelle	Bât 4 Valbonne	Bât 6 Montpellier
Mesuré (MWh)	79.59	-	23.31	19.53
Simulé (MWh)	81.92	-	22.50	18.78
NMBE (%)	-3	-	3	4
CV(RMSE) (%)	85	-	137	188
R ²	0.78	-	0.61	0.59

Il a été décidé par l'ensemble du groupement d'écarter la simulation du Bât 3 car la demande de froid est très faible.

Le coefficient de détermination du Bât 4 et du Bât 6 ne respecte pas le critère car nous rencontrons des difficultés à dessiner de façon réaliste les masques proches que sont les arbres.



f. Etude paramétrique : analyse de sensibilité

L'étude paramétrique est réalisée grâce à jEPlus, un outil permettant la réalisation d'étude paramétrique pour EnergyPlus et TRNSYS. Un projet jEPlus regroupe un ou plusieurs modèles, un ou plusieurs fichiers météo et des scripts. Chaque paramètre étudié et ses valeurs doivent être définis par l'utilisateur. Cela donne ensuite plusieurs cas de simulation qui seront traités par EnergyPlus. L'ensemble des fichiers de résultats sera concaténé dans un seul fichier par les scripts de jEPlus.

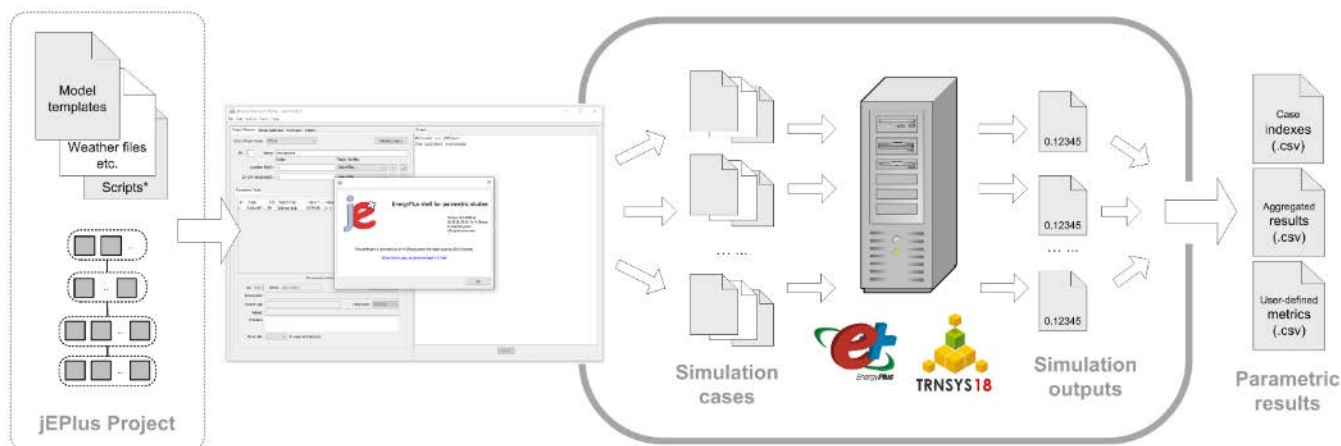


Figure 17 : Fonctionnement de jEPlus

L'étude paramétrique permet l'analyse de sensibilité, l'optimisation d'un modèle et l'analyse d'incertitude. Dans notre cas, nous avons réalisé une analyse de sensibilité sur plusieurs paramètres définis en amont. Elle permet d'identifier les paramètres qui influencent le plus les besoins frigorifiques. Par la suite, les effets croisés des paramètres validés ont été étudiés. Ces résultats seront ensuite exportés vers l'outil CLIMESTIM.

Les paramètres identifiés sont :

	La Réunion	France métropolitaine
Environnement	Fichier météo Orientation Albédo	Fichier météo Orientation Albédo
Enveloppe du bâtiment	Isolation de la toiture Couleur de la toiture Pare-soleil ventilé horizontal Isolation des murs Couleurs des murs Pare-soleil ventilé vertical Protections solaires Étanchéité à l'air Ventilation naturelle Ventilation nocturne	Inertie thermique Isolation de la toiture Couleur de la toiture Isolation des murs Couleurs des murs Performance du vitrage Protections solaires Étanchéité à l'air Ventilation naturelle Ventilation nocturne
Systèmes	Température de consigne Ventilation mécanique	Température de consigne Ventilation mécanique
Apports internes	Densité d'occupation Planning d'occupation	Densité d'occupation Planning d'occupation

Tableau 18 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur GEG1

Paramètre	Base	Valeur	Besoins (kWh)		Puissance (W)	
P1 : Orientation	15°	0°	164343.15	-1.0%	251258.30	-1.6%
		45°	167388.11	0.9%	262059.59	2.6%
		90°	161148.61	-2.9%	239568.38	-6.2%
		135°	164774.38	-0.7%	259345.01	1.6%
		180°	160926.77	-3.0%	249707.60	-2.2%
		225°	161369.10	-2.7%	260195.94	1.9%
		270°	157712.82	-4.9%	241033.78	-5.6%
		315°	164347.36	-0.9%	262351.30	2.7%
P2 : Albédo	0.2	0.2	165920.00	0.0%	255359.24	0.0%
		0.6	186250.70	12.3%	279708.77	9.5%
		0.2 + ICU 1°C	214976.71	29.6%	329558.26	29.1%
P3a : Parois horizontales	isolation = 0.08 m + couleur = 0.977	isolation = 0.001 m + couleur = 0.977	175908.24	6.0%	293456.94	14.9%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	157278.82	-5.2%	245244.09	-4.0%
		isolation = 0.08 m + couleur = 0.977	165920.00	0.0%	255359.24	0.0%
		isolation = 0.08 m + couleur = 0.282	160454.12	-3.3%	242691.12	-5.0%
P3b : Parois verticales	isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	214278.87	29.1%	319675.96	25.2%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	165920.00	0.0%	255359.24	0.0%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.712	239744.50	44.5%	324968.65	27.3%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.282	222740.76	34.2%	303572.74	18.9%
P6a : Brise-soleils	voir modèle	AlwaysOff	230516.13	38.9%	322019.59	26.1%
		AlwaysOn (α=25°)	136341.47	-17.8%	226287.65	-11.4%
P8 : Renouvellement d'air	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	165920.00	0.0%	255359.24	0.0%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	138549.53	-16.5%	228602.69	-10.5%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	157835.79	-4.9%	254908.91	-0.2%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	135412.84	-18.4%	228508.72	-10.5%
P9 : Température de consigne (°C)	26°C	22°C	346406.91	108.8%	565781.91	121.6%
		24°C	253600.52	52.8%	404432.37	58.4%
		26°C	165920.00	0.0%	255359.24	0.0%
		28°C	92222.26	-44.4%	146459.01	-42.6%

Les intervalles de valeurs pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- $-4.9 \% \leq \text{Orientation} \leq 0.9 \%$
- $0.0 \% \leq \text{Albédo} \leq 29.6 \%$
- $-5.2 \% \leq \text{Parois horizontales} \leq 6.0 \%$
- $0.0 \% \leq \text{Parois verticales} \leq 44.5 \%$
- $-17.8 \% \leq \text{Brise-soleils} \leq 38.9 \%$
- $-18.4 \% \leq \text{Renouvellement d'air} \leq 0.0 \%$
- $-44.4 \% \leq \text{Température de consigne} \leq 108.8 \%$

Nous considérons un écart de plus de 10 % entre la valeur minimale et maximale comme validation pour l'influence d'un paramètre.

Tableau 19 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur GEG2

Paramètre	Base	Valeur	Besoins (kWh)		Puissance (W)	
P1 : Orientation	10°	0°	93555.87	-0.3%	151808.98	0.3%
		45°	99495.14	6.0%	163781.46	8.2%
		90°	101905.78	8.6%	176126.06	16.3%
		135°	98752.28	5.2%	165479.1	9.3%
		180°	97757.57	4.1%	157202	3.8%
		225°	98329.82	4.7%	166786.67	10.2%
		270°	98141.52	4.5%	160725.05	6.2%
		315°	96145.43	2.4%	162157.41	7.1%
P2 : Albédo	0.2	0.2	93871.65	0.0%	151384.74	0.0%
		0.6	112697.81	20.1%	173784.91	14.8%
		0.2 + ICU 1°C	117231.45	24.9%	200178.92	32.2%
P3a : Parois horizontales	isolation = 0.05 m + couleur = 0.977	isolation = 0.001 m + couleur = 0.977	97335.82	3.7%	163727.76	8.2%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	88354	-5.9%	142250.57	-6.0%
		isolation = 0.05 m + couleur = 0.977	93871.65	0.0%	151384.74	0.0%
		isolation = 0.05 m + couleur = 0.282	91266.44	-2.8%	143019.48	-5.5%
P3b : Parois verticales	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	93871.65	0.0%	151384.74	0.0%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	77003.94	-18.0%	129430.66	-14.5%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.712	94990.11	1.2%	148487.11	-1.9%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.282	89334.67	-4.8%	133966.09	-11.5%
P6a : Brise-soleils	voir modèle	AlwaysOff	109709.4	16.9%	156733.48	3.5%
		AlwaysOn ($\alpha=25^\circ$)	82951.52	-11.6%	148671.06	-1.8%
P8 : Renouvellement d'air	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	93871.65	0.0%	151384.74	0.0%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	88580.96	-5.6%	139649.66	-7.8%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	92842.59	-1.1%	147463.56	-2.6%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	87993.38	-6.3%	136916.78	-9.6%
P9 : Température de consigne (°C)	26°C	22°C	203365.55	116.6%	399239	163.7%
		24°C	147642.93	57.3%	273670.99	80.8%
		26°C	93871.65	0.0%	151384.74	0.0%
		28°C	47406.22	-49.5%	97065.46	-35.9%

Les intervalles de valeurs pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- $-0.3 \% \leq \text{Orientation} \leq 8.6 \%$
- **$0.0 \% \leq \text{Albédo} \leq 24.9 \%$**
- $-5.9 \% \leq \text{Parois horizontales} \leq 3.7 \%$
- **$-18.0 \% \leq \text{Parois verticales} \leq 1.2 \%$**
- **$-11.6 \% \leq \text{Brise-soleils} \leq 16.9 \%$**
- $-6.3 \% \leq \text{Renouvellement d'air} \leq 0.0 \%$
- **$-49.5 \% \leq \text{Température de consigne} \leq 116.6 \%$**

Tableau 20 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur GEG3

Paramètre	Base	Valeur	Besoins (kWh)		Puissance (W)	
P1 : Orientation	355°	0°	186319.72	-0.5%	378417.7	0.3%
		45°	193321.77	3.2%	448335.55	18.8%
		90°	204460.47	9.2%	467980.61	24.0%
		135°	190404.62	1.7%	428304.94	13.5%
		180°	165913.53	-11.4%	375219.43	-0.6%
		225°	183385.65	-2.1%	440164.05	16.7%
		270°	201736.24	7.7%	463075.48	22.7%
		315°	203063.7	8.4%	441486.18	17.0%
P2 : Albédo	0.2	0.2	187274.42	0.0%	377332.31	0.0%
		0.6	192522.4	2.8%	386039.63	2.3%
		0.2 + ICU 1°C	226688.83	21.0%	477811.19	26.6%
P3a : Parois horizontales	isolation = 0.08 m + couleur = 0.712	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	198906.03	6.2%	389598.89	3.3%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	181208.46	-3.2%	367387.81	-2.6%
		isolation = 0.08 m + couleur = 0.712	187274.42	0.0%	377332.31	0.0%
		isolation = 0.08 m + couleur = 0.282	183060.87	-2.2%	371416.75	-1.6%
P3b : Parois verticales	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	187274.42	0.0%	377332.31	0.0%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	179288.35	-4.3%	368479.94	-2.3%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.712	227037.67	21.2%	411239.04	9.0%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.282	226416.38	20.9%	409384.29	8.5%
P6a : Brise-soleils	voir modèle	AlwaysOff	187274.42	0.0%	377332.31	0.0%
		AlwaysOn ($\alpha=25^\circ$)	127003.9	-32.2%	326774.19	-13.4%
P8 : Renouvellement d'air	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Always Off	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	226522.26	21.0%	384567.64	1.9%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	188247.9	0.5%	291366.46	-22.8%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	218135.17	16.5%	384567.64	1.9%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	185483.64	-1.0%	291366.45	-22.8%
P9 : Température de consigne (°C)	26°C	22°C	337537.98	80.2%	767164.69	103.3%
		24°C	259941.18	38.8%	569586.21	51.0%
		26°C	187274.42	0.0%	377332.31	0.0%
		28°C	122578.66	-34.5%	196854.11	-47.8%

Les intervalles de valeurs pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- **-11.4 % ≤ Orientation ≤ 9.2 %**
- **0.0 % ≤ Albédo ≤ 21.0 %**
- **-3.2 % ≤ Parois horizontales ≤ 6.2 %**
- **-4.3 % ≤ Parois verticales ≤ 21.2 %**
- **-32.2 % ≤ Brise-soleils ≤ 0.0 %**
- **-1.0 % ≤ Renouvellement d'air ≤ 21.0 %**
- **-34.5 % ≤ Température de consigne ≤ 80.2 %**

Tableau 21 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur GEG4

Paramètre	Base	Valeur	Besoins (kWh)		Puissance (W)	
P1 : Orientation	0°	0°	40249.54	0.0%	75754.5	0.0%
		45°	44199.53	9.8%	81886.74	8.1%
		90°	42791.64	6.3%	75256.08	-0.7%
		135°	41539.88	3.2%	74393.33	-1.8%
		180°	41252.2	2.5%	74433.63	-1.7%
		225°	40272.75	0.1%	74340.71	-1.9%
		270°	37126.36	-7.8%	69537.89	-8.2%
		315°	37188.37	-7.6%	71176.59	-6.0%
P2 : Albédo	0.2	0.2	40249.54	0.0%	75754.5	0.0%
		0.6	41949.09	4.2%	80093.38	5.7%
		0.2 + ICU 1°C	47557.63	18.2%	96668.21	27.6%
P3a : Parois horizontales	isolation = 0.08 m + couleur = 0.977	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	40013.19	-0.6%	74945.52	-1.1%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	36597.97	-9.1%	62627.77	-17.3%
		isolation = 0.08 m + couleur = 0.712	39499.11	-1.9%	72700.69	-4.0%
		isolation = 0.08 m + couleur = 0.282	38240.23	-5.0%	67246.95	-11.2%
P3b : Parois verticales	isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	45098.32	12.0%	89579.19	18.2%
		isolation = 0.001 m + couleur = 0.282	40249.54	0.0%	75754.5	0.0%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.712	50048.45	24.3%	105239.62	38.9%
		isolation = 0.04 m + couleur = 0.282	48382.15	20.2%	97780.49	29.1%
P6a : Brise-soleils	voir modèle	AlwaysOff	40249.54	0.0%	75754.5	0.0%
		AlwaysOn ($\alpha=25^\circ$)	27398.48	-31.9%	53201.1	-29.8%
P8 : Renouvellement d'air	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	40249.54	0.0%	75754.5	0.0%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	32383.26	-19.5%	50383.99	-33.5%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	38984.61	-3.1%	75561.06	-0.3%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	31893.6	-20.8%	50381.73	-33.5%
P9 : Température de consigne (°C)	27.5°C	22°C	73054.28	81.5%	187299.31	147.2%
		24°C	61670.87	53.2%	145852.3	92.5%
		26°C	49423.93	22.8%	105263.14	39.0%
		28°C	37164.28	-7.7%	66052.41	-12.8%

Les intervalles de valeurs pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- **-7.8 % ≤ Orientation ≤ 9.8 %**
- **0.0 % ≤ Albédo ≤ 18.2 %**
- **-9.1 % ≤ Parois horizontales ≤ -0.6 %**
- **0.0 % ≤ Parois verticales ≤ 24.3 %**
- **-31.9 % ≤ Brise-soleils ≤ 0.0 %**
- **-20.8 % ≤ Renouvellement d'air ≤ 0.0 %**
- **-7.7 % ≤ Température de consigne ≤ 81.5 %**

Tableau 22 : Résultats de l'analyse de sensibilité du Bât 2

Paramètre	Base	Valeur	Besoins (kWh)	Puissance (W)
P0 : Fichier météo	FRA_AR_Grenoble.CAIPOS.epw	FRA_AC_La.Rochelle.epw	40174.36	-60.3%
P1 : Orientation	0	0°	101092.93	0.0%
		45°	105602.63	4.5%
		90°	104902.09	3.8%
		135°	105628.67	4.5%
		180°	102164.16	1.1%
		225°	107771.12	6.6%
		270°	112978.48	11.8%
		315°	108915.84	7.7%
P2 : Albédo	0.2	0.2	101092.93	0.0%
		0.6	120121.91	18.8%
		0.2 + ICU 1°C	118485.1	17.2%
P3a : Parois horizontales	isolation = 0.1 m + couleur = 0.977	isolation = 0.01 m + couleur = 0.977	103563	2.4%
		isolation = 0.2 m + couleur = 0.282	104702.7	3.6%
P3b : Parois verticales	isolation = 0.02 m + couleur = 0.282	isolation = 0.01 m + couleur = 0.712	101149.51	0.1%
		isolation = 0.1 m + couleur = 0.282	107370.42	6.2%
P3c : Parois vitrées	Simple Glazing Double Glazing (Extension)	Simple vitrage clair	97898.39	-3.2%
		Double vitrage clair	103495.12	2.4%
P4 : Inertie	2240 kg/m3	1280 kg/m3	102930.28	1.8%
		2240 kg/m3	101092.93	0.0%
P6a : Brise-soleils	voir modèle	AlwaysOff	112894.3	11.7%
		AlwaysOn ($\alpha=25^\circ$)	59282.75	-41.4%
P8 : Renouvellement d'air	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	101092.93	0.0%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	78133.01	-22.7%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	86539.13	-14.4%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	72831.31	-28.0%
P9 : Température de consigne (°C)	28°C	22°C	230106.07	127.6%
		24°C	184398.92	82.4%
		26°C	140620.6	39.1%
		28°C	101092.93	0.0%

Les intervalles de valeurs pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- **0.0 % ≤ Orientation ≤ 11.8 %**
- **0.0 % ≤ Albédo ≤ 18.8 %**
- **0.0 % ≤ Parois horizontales ≤ 3.6 %**
- **0.0 % ≤ Parois verticales ≤ 6.2 %**
- **-3.2 % ≤ Parois vitrées ≤ 2.4 %**
- **0.0 % ≤ Inertie ≤ 1.8 %**
- **-41.4 % ≤ Brise-soleils ≤ 11.7 %**
- **-28.0 % ≤ Renouvellement d'air ≤ 0.0 %**
- **0.0 % ≤ Température de consigne ≤ 127.6 %**

Tableau 23 : Résultats de l'analyse de sensibilité du Bât 4

Paramètre	Base	Valeur	Besoins (kWh)		Puissance (W)	
P0 : Fichier météo	FRA_PR_Valbonne.epw	FRA_AC_La.Rochelle.epw	2578.47	-91.2%	34436.87	-74.1%
P1 : Orientation	5°	0°	28843.5	-1.2%	131465.24	-1.3%
		45°	29304.72	0.4%	136969.72	2.8%
		90°	26305.37	-9.9%	119126.3	-10.6%
		135°	24104.78	-17.4%	101954.27	-23.5%
		180°	24321.07	-16.7%	102657.41	-22.9%
		225°	26683.01	-8.6%	127706.82	-4.1%
		270°	26847.22	-8.1%	121447.84	-8.8%
		315°	25933.55	-11.2%	114143.88	-14.3%
P2 : Albédo	0.2	0.2	29198.56	0.0%	133199.33	0.0%
		0.6	30197.72	3.4%	140344.53	5.4%
		0.2 + ICU 1°C	38060.28	30.3%	194594.75	46.1%
P3a : Parois horizontales	isolation = 0.1 m + couleur = 0.977	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	31995.91	9.6%	166104.14	24.7%
		isolation = 0.2 m + couleur = 0.282	27203.6	-6.8%	115645.25	-13.2%
P3b : Parois verticales	isolation = 0.05 m + couleur = 0.712	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	26931.16	-7.8%	118828.08	-10.8%
		isolation = 0.1 m + couleur = 0.282	27277.44	-6.6%	119868.39	-10.0%
P3c : Parois vitrées	Double vitrage performant clair	Simple vitrage clair	32091.45	9.9%	133412.51	0.2%
		Double vitrage clair	31405.59	7.6%	139295.74	4.6%
P4 : Inertie	2240 kg/m3	1280 kg/m3	29221.78	0.1%	159577.52	19.8%
		2240 kg/m3	29198.56	0.0%	133199.33	0.0%
P6a : Brise-soleils	voir modèle	AlwaysOff	65054.38	122.8%	340665.78	155.8%
		AlwaysOn (α=25°)	25713.08	-11.9%	102921.69	-22.7%
P8 : Renouvellement d'air	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	29198.56	0.0%	133199.33	0.0%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	16152.45	-44.7%	84673.21	-36.4%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	23967.49	-17.9%	101881.55	-23.5%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	15247.4	-47.8%	84464.56	-36.6%
P9 : Température de consigne (°C)	28°C	22°C	76398.17	161.7%	401419.22	201.4%
		24°C	58279.45	99.6%	289099.13	117.0%
		26°C	40637.35	39.2%	183017.58	37.4%
		28°C	24539.58	-16.0%	105621.22	-20.7%

Les intervalles de valeurs pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- **-17.4 % ≤ Orientation ≤ 0.4 %**
- **0.0 % ≤ Albédo ≤ 30.3 %**
- **-6.8 % ≤ Parois horizontales ≤ 9.6 %**
- **-7.8 % ≤ Parois verticales ≤ 0.0 %**
- **0.0 % ≤ Parois vitrées ≤ 9.9 %**
- **0.0 % ≤ Inertie ≤ 0.1 %**
- **-11.9 % ≤ Brise-soleils ≤ 122.8 %**
- **-47.8 % ≤ Renouvellement d'air ≤ 0.0 %**
- **-16.0 % ≤ Température de consigne ≤ 161.7 %**

Tableau 24 : Résultats de l'analyse de sensibilité du Bât 6

Paramètre	Base	Valeur	Besoins (kWh)		Puissance (W)	
P0 : Fichier météo	FRA_LP_Montpellier.epw	FRA_AC_La.Rochelle.epw	10343.72	-57.1%	65784.77	-66.0%
P1 : Orientation	20°	0°	25212.33	4.5%	202506.74	4.8%
		45°	22863.45	-5.2%	178073.76	-7.9%
		90°	24306.07	0.8%	189292.3	-2.1%
		135°	27425.02	13.7%	215571.27	11.5%
		180°	26096.25	8.2%	204276.95	5.7%
		225°	21423.41	-11.2%	157137.03	-18.7%
		270°	24006.14	-0.5%	183752.78	-4.9%
		315°	25865.03	7.2%	201978.41	4.5%
P2 : Albédo	0.2	0.2	24121.32	0.0%	193293.59	0.0%
		0.6	28283.84	17.3%	211504.35	9.4%
		0.2 + ICU 1°C	27963.14	15.9%	222190.4	14.9%
P3a : Parois horizontales	isolation = 0.1 m + couleur = 0.7	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	24147.44	0.1%	203426.56	5.2%
		isolation = 0.2 m + couleur = 0.282	24304.91	0.8%	188497.62	-2.5%
P3b : Parois verticales	isolation = 0.05 m + couleur = 0.712	isolation = 0.001 m + couleur = 0.712	24044.67	-0.3%	197306.5	2.1%
		isolation = 0.1 m + couleur = 0.282	24378.24	1.1%	193667.17	0.2%
P3c : Parois vitrées	Double vitrage performant clair	Simple vitrage clair	23498.93	-2.6%	188840.52	-2.3%
		Double vitrage clair	25009.78	3.7%	197930.84	2.4%
P4 : Inertie	2240 kg/m3	1280 kg/m3	24596.2	2.0%	209429.26	8.3%
		2240 kg/m3	24121.32	0.0%	193293.59	0.0%
P6a : Brise-soleils	voir modèle	AlwaysOff	56285.83	133.3%	358998.46	85.7%
		AlwaysOn (α=25°)	15424.07	-36.1%	141129.37	-27.0%
P8 : Renouvellement d'air	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	24121.32	0.0%	193293.59	0.0%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Always Off + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	11701.56	-51.5%	115835.6	-40.1%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Always Off + ventilation mécanique = Planning HVAC	17943.22	-25.6%	192897.38	-0.2%
		infiltration = 0.0003 m3/s per m2 facade + ventilation naturelle = Planning Ventilation diurne + ventilation nocturne = Planning Ventilation nocturne + ventilation mécanique = Planning HVAC	10285.85	-57.4%	115668.8	-40.2%
P9 : Température de consigne (°C)	28°C	22°C	47844.6	98.3%	353517.67	82.9%
		24°C	39556.26	64.0%	295146.17	52.7%
		26°C	31546.22	30.8%	241552.09	25.0%
		28°C	24121.32	0.0%	193293.59	0.0%

Les intervalles de valeurs pour l'analyse de sensibilité à partir des besoins frigorifiques sont :

- **-11.2 % ≤ Orientation ≤ 13.7 %**
- **0.0 % ≤ Albédo ≤ 17.3 %**
- 0.0 % ≤ Parois horizontales ≤ 0.8 %
- -0.3 % ≤ Parois verticales ≤ 1.1 %
- -2.6 % ≤ Parois vitrées ≤ 3.7 %
- 0.0 % ≤ Inertie ≤ 2.0 %
- **-36.1 % ≤ Brise-soleils ≤ 133.3 %**
- **-57.4 % ≤ Renouvellement d'air ≤ 0.0 %**
- **0.0 % ≤ Température de consigne ≤ 98.3 %**

g. Etude paramétrique : effets croisés

Par la suite, les effets croisés des paramètres influents ont été étudiés. Ces résultats ont ensuite été exportés vers l'outil CLIMESTIM.

Pour cette partie, l'ensemble des hypothèses de chaque bâtiment a été normalisé afin d'avoir des résultats comparables entre eux :

- Fichier météo similaire
- Simulation annuelle
- Nombre de jours travaillés similaire
- Aucune protection solaire
- Mêmes apports internes

Seule l'enveloppe du bâtiment reste spécifique à chaque projet.

La Réunion

Afin de s'affranchir des nombreuses simulations liées au croisement des différents paramètres, une analyse croisée a été menée sur un nombre réduit de paramètres :

- environnement (bétonné ou végétalisé)
- présence de protections solaires (brise-soleils fixes avec un angle d'incidence de 30°) ou pas
- isolation des murs (4 cm de laine de roche) ou pas
- couleur des murs (blanc ou gris béton)
- ventilation nocturne ou pas
- température de consigne (22 à 28°C avec un pas de 2°C)

Cela a abouti à 128 simulations par site d'étude, soient 512 simulations en tout.

L'impact des autres paramètres influents selon l'analyse de sensibilité a été estimé par calcul dans la mesure du possible (pour limiter le nombre de simulations).

Les hypothèses sont présentées ci-dessous, en rouge celles qui diffèrent des paramètres de calibrage :

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Fichier météo	St Pierre	St Pierre	St Pierre	St Pierre
Simulation	Du 01/01/2023 Au 31/12/2023	Du 01/01/2023 Au 31/12/2023	Du 01/01/2023 Au 31/12/2023	Du 01/01/2023 Au 31/12/2023
Jours spéciaux (non travaillés)	Jours fériés Samedi Dimanche	Jours fériés Samedi Dimanche	Jours fériés Samedi Dimanche	Jours fériés Samedi Dimanche
Albédo	0.2	0.2	0.2	0.2
Isolation de toiture	8 cm	5 cm	8 cm	8 cm
Couleur de toiture	0.977 – noir	0.977 – noir	0.712 – gris	0.977 – noir
Isolation de façade	0.1 cm	0.1 cm	0.1 cm	0.1 cm
Couleur de façade	0.282 – blanc	0.712 – rouge foncé	0.282 – blanc	0.282 – blanc
Protection solaire	non	non	non	non
Occupants	10 m ² /pers	10 m ² /pers	10 m ² /pers	10 m ² /pers
Eclairage	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²
Equipements	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²
Infiltration	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²
Ventilation mécanique	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers
Temp. de consigne	26 °C	26 °C	26 °C	26 °C
Planning CVC	De 6h à 17h	De 6h à 17h	De 6h à 17h	De 6h à 17h

Les intervalles de valeurs pour les effets croisés à partir des besoins frigorifiques sont :

- $52\,367 \leq \text{GEG1} \leq 532\,261$ kWh
- $17\,547 \leq \text{GEG2} \leq 349\,509$ kWh
- $37\,846 \leq \text{GEG3} \leq 461\,225$ kWh
- $9\,752 \leq \text{GEG4} \leq 115\,259$ kWh

Les intervalles de valeurs pour les effets croisés à partir des puissances frigorifiques sont :

- $103\,164 \leq \text{GEG1} \leq 813\,678$ kW
- $104\,685 \leq \text{GEG2} \leq 602\,295$ kW
- $97\,474 \leq \text{GEG3} \leq 833\,336$ kW
- $24\,581 \leq \text{GEG4} \leq 205\,270$ kW

La configuration de bâtiment le moins consommateur est :

- Environnement végétalisé
- Protection solaire optimale
- Aucune isolation des murs
- Couleur blanche des murs
- Ventilation nocturne
- Température de consigne à 28°C

France métropolitaine

Afin de s'affranchir des nombreuses simulations liées au croisement des différents paramètres, une analyse croisée a été menée sur un nombre réduit de paramètres :

- localisation (Grenoble ou La Rochelle)
- orientation (de 0 à 270° avec un pas de 90°)
- environnement (bitumé ou végétalisé)
- présence de protections solaires (brise-soleils fixes avec un angle d'incidence de 30°) ou pas
- isolation des toits (20 cm de PSE) ou pas
- couleur des toits (blanc ou gris béton)
- ventilation diurne ou pas
- ventilation nocturne ou pas
- température de consigne (22 à 28°C avec un pas de 2°C)

Cela a abouti à 1536 simulations par site d'étude, soient 4608 simulations en tout.

L'impact des autres paramètres influents selon l'analyse de sensibilité a été estimé par calcul dans la mesure du possible (pour limiter le nombre de simulations).

Les hypothèses sont présentées ci-dessous, en rouge celles qui diffèrent des paramètres de calibrage :

	Bât 2 Grenoble	Bât 3 La Rochelle	Bât 4 Valbonne	Bât 6 Montpellier
Fichier météo	CAIPOS	-	CAIPOS	CAIPOS
Simulation	Du 01/01/2023 Au 31/12/2023	-	Du 01/01/2023 Au 31/12/2023	Du 01/01/2023 Au 31/12/2023
Jours spéciaux (non travaillés)	Jours fériés Samedi Dimanche	-	Jours fériés Samedi Dimanche	Jours fériés Samedi Dimanche
Albédo	0.2	-	0.2	0.2
Isolation de toiture	10 cm	-	10 cm	10 cm
Couleur de toiture	0.977 – noir	-	0.712 – gris	0.712 – gris
Isolation de façade	2 cm	-	5 cm	5 cm
Couleur de façade	0.282 – blanc	-	0.712 – gris	0.434 – ivoire
Protection solaire	non	-	non	non
Occupants	10 m ² /pers	-	10 m ² /pers	10 m ² /pers
Eclairage	5 W/m ²	-	5 W/m ²	5 W/m ²
Equipements	10 W/m ²	-	10 W/m ²	10 W/m ²
Infiltration	1.08 m ³ /h.m ²	-	1.08 m ³ /h.m ²	1.08 m ³ /h.m ²
Ventilation mécanique	25 m ³ /h.pers	-	25 m ³ /h.pers	25 m ³ /h.pers
Temp. de consigne	28 °C	-	26 °C	28 °C
Planning CVC	De 7h à 19h	-	De 7h à 19h	De 10h à 18h

Les intervalles de valeurs pour les effets croisés à partir des besoins frigorifiques sont :

- 12 504 ≤ Bât 2 Grenoble ≤ 253 026 kWh
- 534 ≤ Bât 4 Valbonne ≤ 118 529 kWh
- 1 046 ≤ Bât 6 Montpellier ≤ 57 702 kWh

Les intervalles de valeurs pour les effets croisés à partir des puissances frigorifiques sont :

- 157 155 ≤ Bât 2 Grenoble ≤ 1 333 819 kW
- 40 348 ≤ Bât 4 Valbonne ≤ 377 504 kW
- 28 557 ≤ Bât 6 Montpellier ≤ 308 975 kW

La configuration de bâtiment le moins consommateur est :

- Localisation : La Rochelle
- Environnement végétalisé
- Protection solaire optimale
- Peu importe l'isolation de toit
- Peu importe la couleur de toit
- Ventilation diurne avec T < 28°C
- Ventilation nocturne
- Température de consigne à 28°C

3. Conclusion

Seize bâtiments (8 GEG – 8 VRV) ont été étudiés, répartis équitablement entre :

- **La Réunion** : climat tropical humide (Aw), températures > 18 °C, forte importance des protections solaires.
- **France métropolitaine** : climats Cfb, Csb ou Csa, avec des amplitudes thermiques importantes et une saisonnalité marquée.

Chaque bâtiment est décrit par sa localisation, sa géométrie et les données météorologiques issues de climate.onebuilding.org.

La modélisation est réalisée via :

- Rhino3D + Grasshopper + Honeybee (construction géométrique et zonage),
- SketchUp + Euclid + IDF Editor (édition EnergyPlus),
- Elements (création de fichiers météo personnalisés).

La STD permet d'obtenir les besoins frigorifiques en intégrant :

- l'enveloppe (isolation, couleur, protections solaires),
- les apports internes (occupants, équipements, éclairage),
- l'infiltration,
- la ventilation (naturelle ou mécanique),
- les scénarios d'exploitation,
- la météo locale (stations Météo France ou mesures in situ).

Le calibrage compare valeurs mesurées et simulées via les métriques :

- NMBE, CV(RMSE), R^2 , selon les critères ASHRAE Guideline 14-2014.
- Objectifs : $|NMBE| < 10 \%$ et $CV(RMSE) < 30 \%$ en données horaires.

Les résultats montrent :

- Une bonne correspondance sur les consommations annuelles (écart < 10 % dans la majorité des cas).
- Des CV(RMSE) élevés (60–190 %) liés aux limites de modélisation du CVC (systèmes simplifiés, pertes hydrauliques et électriques non modélisées).
- Les modèles respectent majoritairement les critères sur NMBE et R^2 , à l'exception des bâtiments avec masques proches difficiles à modéliser (arbres notamment).

Réalisée via **jEPlus**, l'étude paramétrique évalue la sensibilité des besoins frigorifiques à divers paramètres : orientation, albédo, isolation, protection solaire, étanchéité, ventilation, température de consigne, densité d'occupation...

Les trois paramètres les plus influents sont :

La Réunion

- Température de consigne (\approx entre 90 et 165 %)
- Brise-soleils (\approx entre 25 et 55 %)
- Parois verticales (\approx entre 20 et 45 %)

France métropolitaine

- Température de consigne (\approx entre 100 et 175 %)
- Brise-soleils (\approx entre 50 et 160 %)
- Renouvellement d'air (\approx entre 30 et 60 %)

Ces résultats constituent la base de calibration du moteur CLIMESTIM, permettant une estimation robuste de la consommation de froid selon un paramétrage simplifié.

En conclusion, le projet a permis :

- de constituer une base de données unique combinant mesures réelles, STD calibrées et études paramétriques,
- de caractériser l'impact des pratiques d'exploitation, des choix architecturaux et des systèmes CVC sur la consommation de froid,
- d'alimenter l'outil CLIMESTIM, destiné aux maîtres d'ouvrage appliquant le décret tertiaire, pour estimer les consommations de climatisation et quantifier les économies potentielles liées à des actions d'amélioration.

ANNEXE 2 : TEST DE L'OUTIL SUR DES SITES REELS

1. Sites Réunion

a. Sites GEG

GEG1

	SYNTHESE			
	mesures	Bâtiment actuel	Scénario 1	
		Sans protections solaires	Ajout de protections solaires	
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation				
Demande de froid	178	MWh/an 260-310	MWh/an	Réduction
Consommation électrique	95	110-140	90-110	-15-20%
production EG	82	75-95	55-75	-25-30%
distribution EG		10-15	10-15	0%
terminaux EG	13	25-30	25-30	0%
unités extérieures VRV		-	-	
unités intérieures VRV		-	-	
Ratios spécifiques attendus				
DIMENSIONNEMENT				
Puissance froide installée		91	91	Wf/m ²
Pompe distribution EG		0.18	0.18	m ³ /h/kWfinst
CONSOMMATIONS				
Demande de froid totale		85-105	60-75	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		35-45	30-40	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		3-4	3-4	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		10-15%	15-20%	<i>de la conso de production de froid</i>
dont unités intérieures VRV		5-10	5-10	kWhe/m ² clim/an
		20-25%	25-30%	<i>de la conso totale clim</i>
		-	-	kWhe/m ² clim/an
				<i>de la conso totale clim</i>
SEER	2.5	2.4-3.4	2.2-3.2	
Part de la clim dans la conso élec totale				

GEG2

SYNTHESE			
	mesures	Bâtiment actuel	
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation			
Demande de froid	99	70-105	
Consommation électrique	52	45-55	
production EG	39	37-44	
distribution EG	3	3-4	
terminaux EG	10	7-8	
unités extérieures VRV		-	
unités intérieures VRV		-	
Ratios spécifiques attendus			
DIMENSIONNEMENT			
Puissance froide installée		81	Wf/m ²
Pompe distribution EG		0.14	m ³ /h/kWfinst
CONSOmmATIONS			
Demande de froid totale		35-55	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		20-30	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		1-2	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		5-10%	de la conso de production de froid
dont unités intérieures VRV		3-4	kWhe/m ² clim/an
		10-15%	de la conso totale clim
		-	kWhe/m ² clim/an
		-	de la conso totale clim
SEER	2.5	2.2-2.6	
Part de la clim dans la conso élec totale			

GEG3

SYNTHESE				
	mesures	Bâtiment actuel	Scénario 1	
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation				
Demande de froid	210	200-260	200-260	0%
Consommation électrique	89	90-120	90-120	0%
production EG	55	65-85	60-80	-5-10%
distribution EG	14	5-10	5-10	0%
terminaux EG	21	25-30	25-30	0%
unités extérieures VRV		-	-	
unités intérieures VRV		-	-	
Ratios spécifiques attendus				
DIMENSIONNEMENT				
Puissance froide installée		127	127	Wf/m ²
Pompe distribution EG		variable	variable	m ³ /h/kWfinst
CONSOmmATIONS				
Demande de froid totale		65-85	65-85	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		30-40	30-40	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		1-2	1-2	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		5-10%	5-10%	de la conso de production de froid
dont unités intérieures VRV		5-10	5-10	kWhe/m ² clim/an
		25-30%	25-30%	de la conso totale clim
		-	-	kWhe/m ² clim/an
		-	-	de la conso totale clim
SEER	3.8	2.9-3.3	3-3.4	
Part de la clim dans la conso élec totale				

GEG4

SYNTHESE						
mesures	Bâtiment actuel	Scénario 1		Scénario 2		
	Pas de protections solaires	Ajout de protections solaires		-5%/degré EG + groupe neuf		
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation						
Demande de froid	63	MWh/an 90-150	MWh/an 70-85	Réduction -35-40%	MWh/an 70-85	Réduction -35-40%
Consommation électrique	38	50-70	45-60	-15-20%	35-50	-25-30%
production EG	24	43-55	34-43	-20-25%	25-33	-35-40%
distribution EG	10	8-9	8-9	0%	8-9	0%
terminaux EG	5	4-5	4-5	0%	4-5	0%
unités extérieures VRV		-	-		-	
unités intérieures VRV		-	-		-	
Ratios spécifiques attendus						
DIMENSIONNEMENT						
Puissance froide installée		167	167		167	Wf/m ² clim
Pompe distribution EG		0.14	0.14		0.14	m ³ /h/kWfinst
CONSOmmATIONS						
Demande de froid totale		105-160	75-95		75-95	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		60-80	50-65		40-55	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		5-10	5-10		5-10	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		15-20%	15-20%		20-25%	<i>de la conso de production de froid</i>
dont unités intérieures VRV		5-10%	5-10%		5-10%	kWhe/m ² clim/an
		-	-		10-15%	<i>de la conso totale clim</i>
		-	-		-	kWhe/m ² clim/an
		-	-		-	<i>de la conso totale clim</i>
SEER	2.6	2.3-2.8	1.9-2.3		2.4-2.9	
Part de la clim dans la conso élec totale						

Site bureaux SWACool

SYNTHESE				
mesures	Bâtiment actuel	Scénario 1		
	Pas de protections solaires	Ajout de protections solaires		
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation				
Demande de froid	104	MWh/an 120-160	MWh/an 100-150	Réduction -10-15%
Consommation électrique	79	70-90	60-80	-5-10%
production EG	51	55-70	50-65	-5-10%
distribution EG	13	4-5	4-5	0%
terminaux EG	15	10-15	10-15	0%
unités extérieures VRV		-	-	
unités intérieures VRV		-	-	
Ratios spécifiques attendus				
DIMENSIONNEMENT				
Puissance froide installée		82	82	Wf/m ² clim
Pompe distribution EG		0.17	0.17	m ³ /h/kWfinst
CONSOmmATIONS				
Demande de froid totale		100-130	80-120	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		60-70	55-65	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		3-4	3-4	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		5-10%	5-10%	<i>de la conso de production de froid</i>
dont unités intérieures VRV		5-10%	5-10%	kWhe/m ² clim/an
		10-15%	15-20%	<i>de la conso totale clim</i>
		-	-	kWhe/m ² clim/an
		-	-	<i>de la conso totale clim</i>
SEER	2	2.3-2.6	2.2-2.5	
Part de la clim dans la conso élec totale				

b. Sites VRV

VRV1

		SYNTHESE	
		mesures	Bâtiment actuel
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation			
Demande de froid			MWh/an
Consommation électrique	48		120-210
production EG			-
distribution EG			-
terminaux EG			-
unités extérieures VRV	38		24-44
unités intérieures VRV	10		8-9
Ratios spécifiques attendus			
DIMENSIONNEMENT			
Puissance froide installée		107	Wf/m ² clim
Pompe distribution EG			m ³ /h/kWf _{inst}
CONSOMMATIONS			
Demande de froid totale		120-215	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		30-55	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		-	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		-	<i>de la conso de production de froid</i>
dont unités intérieures VRV		5-10	<i>de la conso totale clim</i>
SEER		20-25%	kWhe/m ² clim/an
Part de la clim dans la conso élec totale		3.1-3.5	<i>de la conso totale clim</i>

VRV2

		SYNTHESE	
		mesures	Bâtiment actuel
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation			
Demande de froid			MWh/an
Consommation électrique	28		38-51
production EG			-
distribution EG			-
terminaux EG			-
unités extérieures VRV	20		11-18
unités intérieures VRV	8		6-7
Ratios spécifiques attendus			
DIMENSIONNEMENT			
Puissance froide installée		105	Wf/m ² clim
Pompe distribution EG			m ³ /h/kWf _{inst}
CONSOMMATIONS			
Demande de froid totale		30-45	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		10-20	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		-	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		-	<i>de la conso de production de froid</i>
dont unités intérieures VRV		5-10	<i>de la conso totale clim</i>
SEER		25-30%	kWhe/m ² clim/an
Part de la clim dans la conso élec totale		3.1-3.5	<i>de la conso totale clim</i>

VRV3

		SYNTHESE	
		mesures	Bâtiment actuel
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation			
Demande de froid			MWh/an 105-125
Consommation électrique	43		29-38
production EG			-
distribution EG			-
terminaux EG			-
unités extérieures VRV	39		20-28
unités intérieures VRV	4		9-10
Ratios spécifiques attendus			
DIMENSIONNEMENT			
Puissance froide installée		116	Wf/m ² clim
Pompe distribution EG			m ³ /h/kWfinst
CONSOUMATIONS			
Demande de froid totale		95-110	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		25-35	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		-	kWhe/m ² clim/an <i>de la conso de production de froid</i>
dont terminaux EG		-	kWhe/m ² clim/an <i>de la conso totale clim</i>
dont unités intérieures VRV		5-10	kWhe/m ² clim/an <i>de la conso totale clim</i>
SEER		25-30%	
Part de la clim dans la conso élec totale		3.1-3.5	

VRV4

		SYNTHESE		
		mesures	Bâtiment actuel	Scénario 1
			Pas de protections solaires	Ajout de protections solaires
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation				
Demande de froid			MWh/an	MWh/an Réduction
Consommation électrique	23		95-130	75-85 -30-35%
production EG			30-41	24-31 -20-25%
distribution EG			-	-
terminaux EG			-	-
unités extérieures VRV	19		19-31	14-20 -30-35%
unités intérieures VRV	4		10-11	10-11 0%
Ratios spécifiques attendus				
DIMENSIONNEMENT				
Puissance froide installée		121	121	Wf/m ² clim
Pompe distribution EG				m ³ /h/kWfinst
CONSOUMATIONS				
Demande de froid totale		80-110	60-75	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		25-35	20-30	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		-	-	kWhe/m ² clim/an <i>de la conso de production de froid</i>
dont terminaux EG		-	-	kWhe/m ² clim/an <i>de la conso totale clim</i>
dont unités intérieures VRV		5-10	5-10	kWhe/m ² clim/an <i>de la conso totale clim</i>
SEER		25-30%	35-40%	
Part de la clim dans la conso élec totale		3.1-3.5	3.1-3.5	

VRV5

		SYNTHESE	
		mesures	Bâtiment actuel
Réduction potentielle des consommations liées à la climatisation			
Demande de froid			MWh/an
Consommation électrique	3.8		3-5
production EG			-
distribution EG			-
terminaux EG			-
unités extérieures VRV	3		2-4
unités intérieures VRV	0.8		0.5-1
Ratios spécifiques attendus			
DIMENSIONNEMENT			
Puissance froide installée		153	Wf/m ² clim
Pompe distribution EG			m ³ /h/kWf _{inst}
CONSOMMATIONS			
Demande de froid totale		20-40	kWhf/m ² clim/an
Conso élec clim		5-15	kWhe/m ² clim/an
dont distribution EG		-	kWhe/m ² clim/an
dont terminaux EG		-	<i>de la conso de production de froid</i>
dont unités intérieures VRV		2-3	<i>de la conso totale clim</i>
SEER		20-25%	kWhe/m ² clim/an
Part de la clim dans la conso élec totale		3.1-3.5	<i>de la conso totale clim</i>

2. Sites métropole

Détail du paramétrage pour le test sur les 8 cas d'étude

Données générales

Nom du bâtiment		Bât 1	Bât 2	Bât 3	Bât 4
Année de référence		2023	2023	2023	2024
Lieu		Grenoble	BOULOGNE-	Valbonne	Montpellier
Zone météo		Grenoble Réelle 2023	Boulogne météociel	Valbonne réelle 2023	Montpellier réelle
Altitude site		221 m	38 m	177 m	27 m
Albédo extérieur		Végétalisé	Bétonné	Végétalisé	Bétonné
Surface utile des zones climatisées		12 200 m ² SDP	2 890 m ² SDP	3 200 m ² SDP	1 849 m ² SDP
Éclairage	Type d'éclairage majoritaire	LED 50% & NON LED 50%	LED 50% & NON LED 50%	LED 50% & NON LED 50%	Majoritaire NON LED
	Type de poste de travail majoritaire	Majoritairement PC portable + Ecran	Mixe portable/UC	Majoritairement PC portable + Ecran	Majoritairement PC portable + Ecran
Densité d'occupation : faible > 20 m ² /pers - moyenne - 10 m ² /pers > forte		Occupation faible	Occupation moyenne	Occupation moyenne	Occupation moyenne

Enveloppe

Apports solaires	Taux de vitrage du bâtiment	moyennement vitré	Moyennement vitré	moyennement vitré	très vitré
	Surface des menuiseries / surface utile	17%	22%	16%	23%
	Présence de protections solaires, fixes ou mobiles	Oui	En partie	Oui	En partie

Systèmes

Système de climatisation		Groupe d'eau glacée - sur nappe	VRV	Groupe d'eau glacée - sur air	Groupe d'eau glacée - sur air
Température de départ clim (GEG)		8,0 °C		10,0 °C	11,0 °C
Puissance froid installée		45 Wut/m ²	68 Wut/m ²	57 Wut/m ²	89 Wut/m ²
Émetteur		Cassette ou ventilo-convecteur à eau glacée	Cassette ou ventilo-convecteur détente directe (VRV ou split)	Cassette ou ventilo-convecteur à eau glacée	Cassette ou ventilo-convecteur à eau glacée
modulation de puissance ?	Production	Oui	Oui	Oui	Oui
	Pompe primaire	Non	Sans objet	Non	Non
	Pompes de distribution	Non	Sans objet	Non	Oui
	Ventilo-convecteur	Oui	Non	Oui	Non
En inoccupation, arrêt des équipements ?	Production	Non	Oui	Non	Oui
	Pompe primaire	Non	Sans objet	Non	Oui
	Pompes de distribution	Non	Sans objet	Non	Non
	Ventilo-convecteur	Non	Oui	Non	Non

Occupation des locaux

Température de consigne en occupation			27,9 °C	25,2 °C	27,6 °C	27,2 °C	
Température de consigne hors occupation <i>Laisser vide si pas de clim hors occupation</i>							
Semaine type d'occupation	Lundi	Démarrage clim	7:00	7:00	6:00	7:00	
	Mardi	Démarrage clim	7:00	7:00	6:00	7:00	
	Mercredi	Démarrage clim	7:00	7:00	6:00	7:00	
	Jeudi	Démarrage clim	7:00	7:00	6:00	7:00	
	Vendredi	Démarrage clim	7:00	7:00	6:00	7:00	
	Samedi	Démarrage clim	0:00	0:00	9:00	0:00	
	Dimanche	Démarrage clim	0:00	0:00	9:00	0:00	
	Lundi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	18:00	19:00	
	Mardi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	18:00	19:00	
	Mercredi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	18:00	19:00	
Périodes d'innoculation supplémentaires (vacances...)	Période 1	Début	31/07/2023				
		Fin	13/08/2023				
	Période 2	Début					
		Fin					
	Date de démarrage de la clim			15/06/2023	15/06/23	15/06/23	15/06/24
	Date d'arrêt de la clim			14/09/2023	14/09/23	14/09/23	14/09/24

Données générales

Nom du bâtiment		Bât 5	Bât 6	Bât 7	Bât 8
Année de référence		2024	2024	2023	2024
Lieu		Montpellier	Montpellier	La Rochelle	Montpellier
Zone météo		Montpellier réelle	Montpellier réelle	La Rochelle réelle	Montpellier réelle
Altitude site		27 m	27 m	0 m	27
Albédo extérieur		Bétonné	Bétonné	Végétalisé	Végétalisé
Surface utile des zones climatisées		207 m ² SDP	1 262 m ² SDP	14 683 m ² SDP	111 m ² SDP
Éclairage	Type d'éclairage majoritaire	Majoritaire NON LED	Majoritaire NON LED	LED 50% & NON LED 50%	Majoritaire LED
	Bureautique	Majoritairement PC portable + Ecran	Majoritairement PC portable + Ecran	Majoritairement PC portable + Ecran	Majoritairement PC portable + Ecran
Densité d'occupation :					
faible > 20 m ² /pers - moyenne - 10 m ² /pers > forte		Occupation moyenne	Occupation moyenne	Occupation moyenne	Occupation moyenne

Enveloppe

Apports solaires	Taux de vitrage du bâtiment	peu vitré	très vitré	moyennement vitré	peu vitré
	Surface des menuiseries / surface utile	7%	26%	20%	15%
	Présence de protections solaires, fixes ou mobiles	En partie	En partie	En partie	En partie

Systèmes

Système de climatisation		VRV	VRV	Groupe d'eau glacée - sur air	VRV
Température de départ clim (GEG)				13,0 °C	
Puissance froid installée		106 Wut/m ²	92 Wut/m ²	29 Wut/m ²	126 Wut/m ²
Émetteur		Cassette ou ventilo-convecteur détente directe (VRV ou split)	Cassette ou ventilo-convecteur détente directe (VRV ou split)	Cassette ou ventilo-convecteur à eau glacée	Cassette ou ventilo-convecteur détente directe (VRV ou split)
modulation de puissance ?	Production	Oui	Oui	Oui	Oui
	Pompe primaire	Sans objet	Sans objet	Non	Sans objet
	Pompes de distribution	Sans objet	Sans objet	Non	Sans objet
	Ventilo-convecteur	Non	Oui	Oui	Oui
En inoccupation , arrêt des équipements ?	Production	Oui	Oui	Non	Oui
	Pompe primaire	Sans objet	Sans objet	Non	Sans objet
	Pompes de distribution	Sans objet	Sans objet	Non	Sans objet
	Ventilo-convecteur	Oui	Oui	Non	Non

Occupation des locaux

Température de consigne en occupation		26,1 °C	25,2 °C	26,5 °C	26,5 °C	
Température de consigne hors occupation						
<i>Laisser vide si pas de clim hors occupation</i>						
Semaine type d'occupation	Lundi	Démarrage clim	4:00	7:00	7:00	4:00
	Mardi	Démarrage clim	4:00	7:00	7:00	4:00
	Mercredi	Démarrage clim	4:00	7:00	7:00	4:00
	Jeudi	Démarrage clim	4:00	7:00	7:00	4:00
	Vendredi	Démarrage clim	4:00	7:00	7:00	4:00
	Samedi	Démarrage clim	0:00	0:00	0:00	0:00
	Dimanche	Démarrage clim	0:00	0:00	0:00	0:00
	Lundi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	19:00	19:00
	Mardi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	19:00	19:00
	Mercredi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	19:00	19:00
	Jeudi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	19:00	19:00
	Vendredi	Arrêt clim ou réduit	19:00	19:00	19:00	19:00
	Samedi	Arrêt clim ou réduit	0:00	0:00	0:00	0:00
	Dimanche	Arrêt clim ou réduit	0:00	0:00	0:00	0:00
Périodes d'innoculation supplémentaires (vacances...)	Période 1	Début		25/08/2023		
		Fin		03/09/2023		
	Période 2	Début				
		Fin				
Date de démarrage de la clim		15/06/24	15/06/24	22/08/23	15/06/24	
Date d'arrêt de la clim		14/09/24	14/09/24	12/09/23	14/09/24	

Détail du paramétrage pour le test sur le Bât 9 à Marseille

Données générales

Nom du bâtiment	Bât 9	
Année de référence	2017	
Lieu	Marseille	
Zone météo	Marseille	
Altitude site		
Albédo extérieur	Bétonné	
Surface utile des zones climatisées	16 780 m ² SDP	
Éclairage	Type d'éclairage majoritaire	Majoritaire NON LED
Bureautique	Type de poste de travail majoritaire	Majoritairement UC + Ecran
Densité d'occupation : faible > 20 m ² /pers - moyenne - 10 m ² /pers > forte		Occupation moyenne

Enveloppe

Apports solaires	Taux de vitrage du bâtiment	très vitré
	Surface des menuiseries / surface utile	0,3
	Présence de protections solaires, fixes ou mobiles	Non

Systèmes

Système de climatisation		Groupe d'eau glacée - sur air
Température de départ clim (GEG)		5,5 °C
Puissance froid installée		103 Wut/m ²
Émetteur		Cassette ou ventilo-convecteur à eau glacée
modulation de puissance ?	Production	Oui
	Pompe primaire	Oui
	Pompes de distribution	Oui
	Ventilo-convecteur	Oui
En inoccupation, arrêt des équipements ?	Production	Non
	Pompe primaire	Non
	Pompes de distribution	Non
	Ventilo-convecteur	Non

Occupation des locaux

Température de consigne en occupation		24,0 °C	
Température de consigne hors occupation <i>Laisser vide si pas de clim hors occupation</i>		24,0 °C	
Semaine type d'occupation	Lundi	Démarrage clim	7:00
	Mardi	Démarrage clim	7:00
	Mercredi	Démarrage clim	7:00
	Jeudi	Démarrage clim	7:00
	Vendredi	Démarrage clim	7:00
	Samedi	Démarrage clim	0:00
	Dimanche	Démarrage clim	0:00
	Lundi	Arrêt clim ou réduit	19:00
	Mardi	Arrêt clim ou réduit	19:00
	Mercredi	Arrêt clim ou réduit	19:00
	Jeudi	Arrêt clim ou réduit	19:00
	Vendredi	Arrêt clim ou réduit	19:00
	Samedi	Arrêt clim ou réduit	0:00
	Dimanche	Arrêt clim ou réduit	0:00
Périodes d'inoccupation supplémentaires (vacances...)	Période 1	Début	
		Fin	
	Période 2	Début	
		Fin	
Date de démarrage de la clim		01/04/17	
Date d'arrêt de la clim		01/04/18	