

ASPIRHAUT

Dispositif architectural de ventilation naturelle par extraction d'air en toiture

Rapport d'expérimentation CIRAD (Réunion)

Octobre 2025

Equipe technique	Financeurs
 Porteur de projet   	    

Table des Matières

1	PRESENTATION DU PROJET	3
1.1	Rappel du contexte et des enjeux.....	3
1.2	Focus sur le logo ASPIRHAUT	3
2	PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS	4
2.1	Identité du projet.....	4
2.2	Contexte environnemental et énergie.....	5
2.3	Système architectural : Aile 5 (Aile Sud)	6
	Système architectural : Aile 4 (Aile Nord)	7
2.4	Retours d'expérience.....	8
3	ETUDE AERAULIQUE	10
3.1	Métrie de mesures aérauliques	10
3.2	Matériel de mesure	10
3.3	Résultats	12
4	ETUDE CONFORT	16
4.1	Méthodologie.....	16
4.2	Résultats	17
4.3	Conclusion.....	26
5	ETUDE ENERGETIQUE	27
5.1	Méthodologie.....	27
5.2	Résultats	29
5.3	Résultats par scénario	35
6	PRECONISATIONS.....	42
7	ANNEXE : Nombre d'heures au-dessus des seuils de températures issues des simulations thermiques	44

1 PRESENTATION DU PROJET

1.1 Rappel du contexte et des enjeux

Dans les territoires ultramarins tropicaux, la climatisation, très énergivore, représente une part importante de la consommation électrique des bâtiments. Réduire cet usage est un défi majeur pour les futurs projets de construction et de réhabilitation. Le **recours au potentiel aéraulique environnant** permettrait d'assurer une ventilation naturelle efficace, capable de renouveler l'air, d'évacuer les charges thermiques et de procurer un confort sans recourir à des systèmes énergivores.

La **ventilation naturelle traversante** (mise en relation de deux façades opposées) est le principe couramment utilisé, mais elle **a parfois des limites** : contraintes acoustiques, grands linéaires de cheminement aéraulique induisant de fortes pertes de charge et la volumétrie de ces pièces qui induit une performance moindre en ventilation naturelle. De plus, le contexte urbanistique souvent dense limite le potentiel aéraulique sur site.

Depuis quelques années, une **nouvelle typologie de fonctionnement en ventilation naturelle** est apparue pour permettre de ventiler ces espaces efficacement : **l'ouverture en toiture**. Des puits, patios dépressionnaires et des canyons ont ainsi été réalisés sur certains bâtiments exemplaires situés dans plusieurs territoires ultra-marins. Le projet ASPIRHAUT repose sur des mesures sur trois territoires différents : La **Réunion**, **Mayotte** et la **Nouvelle Calédonie**.

Les objectifs du projet ASPIRHAUT sont multiples :

- **Quantifier et objectiver les performances** aérauliques, thermiques, énergétiques et le confort des solutions architecturales aérauliques, pour lesquelles peu de retours d'expérience existent.
- **Souligner l'intérêt** de ces dispositifs **dans la réduction de la consommation énergétique** des bâtiments en climat tropical.

- **Promouvoir l'ingénierie aéraulique** de manière vulgarisée et pédagogique, avec une diffusion des résultats aux territoires ultramarins concernés.
- **Partager le savoir-faire** sur les systèmes novateurs d'extraction naturelle.
- Fournir des **outils de prédimensionnement** pour faciliter la répliquabilité des dispositifs similaires.

Les cas d'études sélectionnés sont situés sur 3 territoires ultra-marins différents :

- L'école Antoine Bertin à Sainte Suzanne de La Réunion ;
- L'amphithéâtre bioclimatique du Moufia à La Réunion ;
- Les nouveaux bâtiments de bureaux du CIRAD à La Réunion ;
- La CAFAT située à Nouméa en Nouvelle Calédonie ;
- Le collège de Bouéni à Mayotte.

Ce projet est financé par l'AQC via le programme OMBREE, l'ADEME, l'Agence Calédonienne de l'Energie et le Gouvernement de Nouvelle Calédonie.

1.2 Focus sur le logo ASPIRHAUT

Nous avons opté pour un logo épuré et bicolore, associant le bleu et le vert. Le bleu représente la fluidité de l'air, soulignant le **principe de ventilation naturelle**, tandis que le vert incarne l'**engagement environnemental** de notre projet. Le « H » d'ASPIRHAUT intègre un schéma de dispositif architectural de ventilation naturelle par extraction d'air en toiture, inspiré du concept du **puits dépressionnaire**. La flèche vert clair, orientée vers le haut, symbolise à la fois l'élévation et l'extraction de l'air par la toiture.



2 PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS



2.1 Identité du projet



Localisation : Ile de La Réunion

Ville : Saint-Pierre

Date de livraison : 2021

Typologie : Bureaux

Superficie totale du projet : 2466 m²

Coût travaux : 7,5 M€

Consommations énergétiques : 11.6 kWh/m²/an (bureaux)

Maîtrise d'ouvrage : CIRAD

Maîtrise d'œuvre : L'Atelier [Architectes et Ingénieurs], IMAGEEN, INSET, Jacques Gandemer Conseil, Acoustique Vivie et Associés, Uni Vert Durable, Hope Architecture

Type de système dépressionnaire mis en œuvre : 2 canyons dépressionnaires dans les ailes 4 et ailes 5.



2.2 Contexte environnemental et énergie

Le pari a été d'assurer le confort des bureaux uniquement en ventilation naturelle, et donc sans utilisation de la climatisation, grâce à dispositif innovant de canyon dépressionnaire associée à une conception bioclimatique globale du projet.

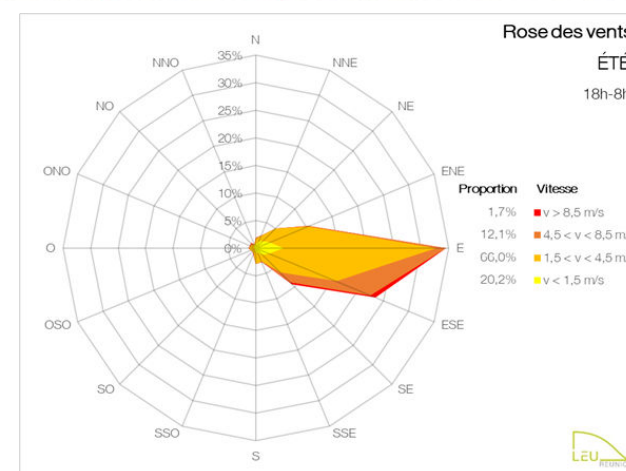
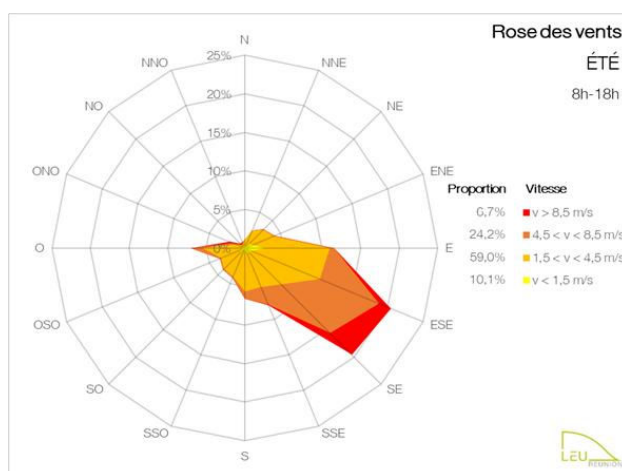
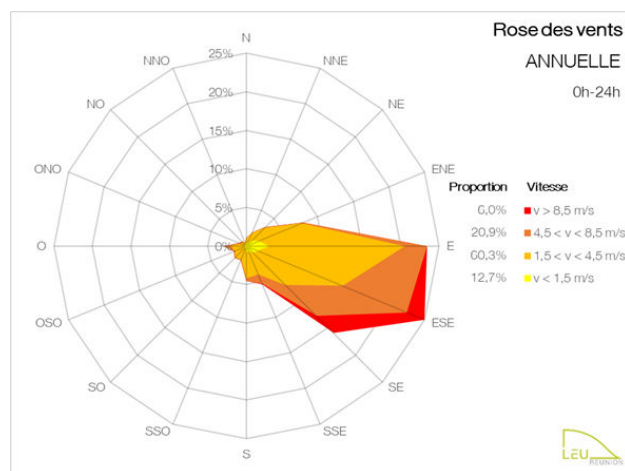
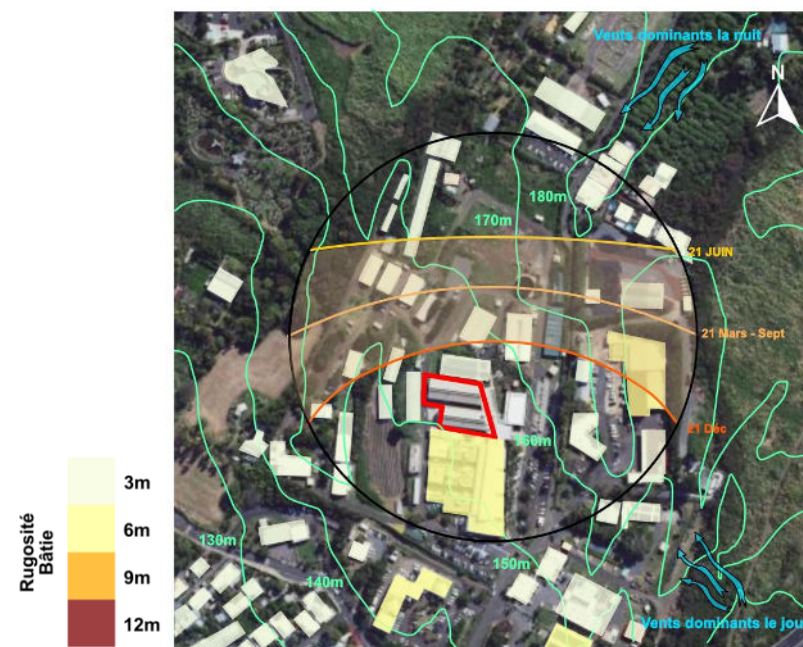
Les vents dominants en été proviennent principalement du Sud-Est, Est-Sud-Est en journée, avec des influences de vent marquées plus à l'Est la nuit. Cependant, les bâtiments étant rapprochés, les deux bâtiments étudiés se font mutuellement des obstacles dans ces directions. De plus, les bâtiments adjacents au Sud Est font également office de masque aéraulique.

Les locaux sont équipés de brasseurs d'air.

Altitude : 157m

Type d'environnement : Péri-urbain

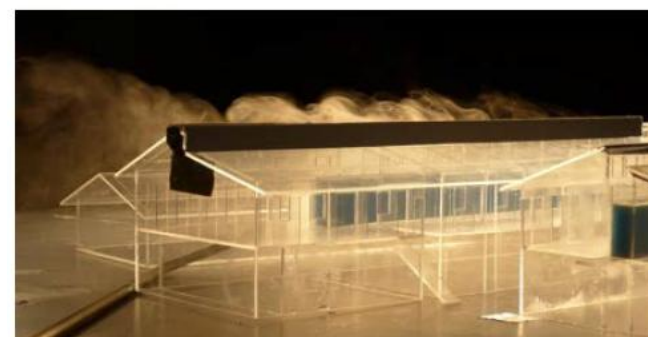
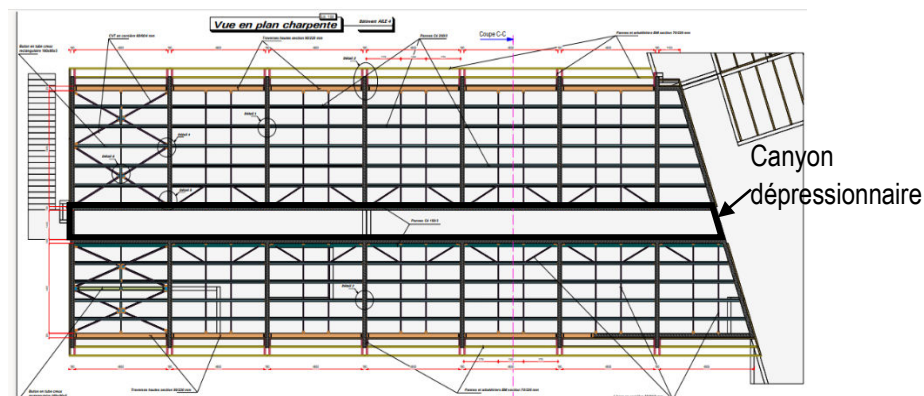
Effet de masques : Bâtiment RDC à proximité immédiate



2.3 Système architectural : Aile 5 (Aile Sud)

Dans cette configuration où des masques aérauliques proches existent, un canyon dépressionnaire peut apporter une solution de ventilation naturelle grâce à son émergence par rapport aux bâtiments environnants. On est dans une configuration bureau / coursive / bureau avec une possibilité de fonctionnement en ventilation traversante si toutes les jalousies sont ouvertes en même temps, ce qui pourrait court-circuiter le fonctionnement du canyon. Les ouvertures des jalousies et ouvrants à la françaises en façades sont manuelles et les jalousies sont motorisées au niveau du canyon. Elles sont asservies à conditions météorologiques extérieures relevées par la GTC mais peuvent se piloter depuis un local technique situé dans le couloir central (donc plutôt à vocation d'être manipulées par un technicien ou le gestionnaire de site).

Gestion des ouvrants	type	Motorisés
Emergence	m	1.23
Dimensions	m * m	35.3*1.44
Surface système	m ²	51
Surfaces ouvertures façade admission	m ²	72.3
Surface ouvertures façade extraction	m ²	45,7
Surface totale des façades	m ²	381
Volume des espaces à ventiler	m ³	868
Ratio surface ouverture admission/ S ventilée	%	20,7%
Ratio surface ouverture extraction/ S ventilée	%	13,1%

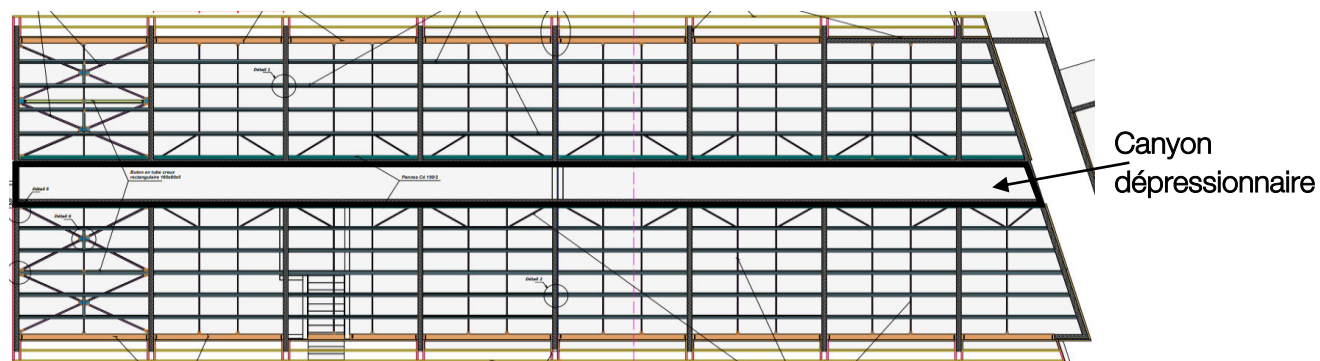
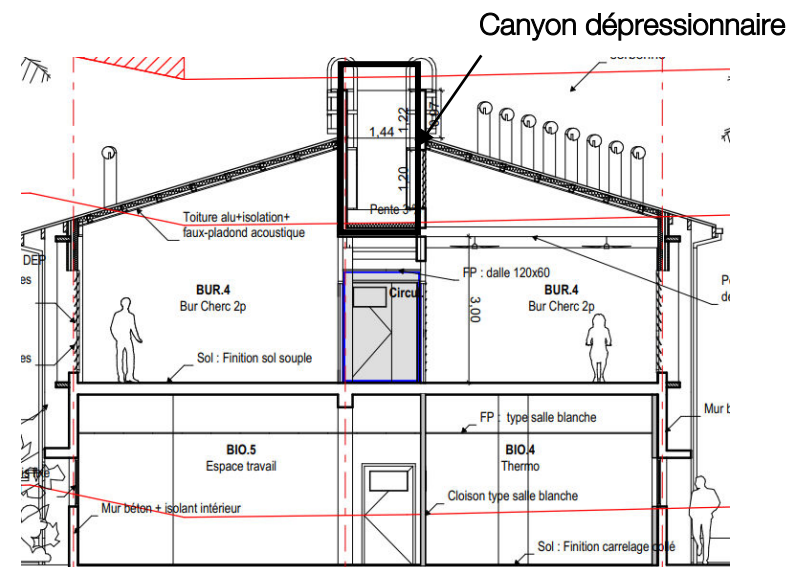


Crédit photo : Laboratoire Eiffel

Système architectural : Aile 4 (Aile Nord)

Dans le cas du CIRAD, les émergences des 2 bâtiments adjacents sont de mêmes dimensions.

Gestion des ouvrants	type	Motorisé
Emergence	m	1.22
Dimensions	m * m	40.4*1.44
Surface système	m ²	58
Surfaces ouvertures façade admission	m ²	56,4
Surface ouvertures façade extraction	m ²	46,7
Surface totale des façades	m ²	456
Volume des espaces à ventiler	m ³	1401
Ratio surface ouverture admission/ S ventilée	%	27,0%
Ratio surface ouverture extraction/ S ventilée	%	22,4%



2.4 Retours d'expérience

2.4.1 Point de vue du concepteur

Personne interrogée : Matthieu Devos, ingénieur qualité environnementale du bâtiment et Elisabeth Pacot, architecte à l'Atelier [Architectes et Ingénieurs]

Retour d'expérience : L'architecte du projet a partagé les particularités et les défis majeurs rencontrés dans la conception et la réalisation de ce bâtiment reposant sur un canyon dépressionnaire pour ventiler l'ensemble des bureaux de chercheurs. L'idée du canyon a émergé au cours des premières phases de conception, à la suite de tests réalisés avec une maquette en soufflerie au laboratoire Eiffel à Paris. Ces essais ont permis d'optimiser la forme des toitures et d'aboutir à une configuration efficace en forme de canyon dépressionnaire, notamment en définissant une hauteur d'émergence. Ces premiers résultats ont permis de recalibrer une étude CFD (modélisation numérique), utilisée par la suite pour explorer des variantes de conception. Plusieurs ajustements significatifs ont été imposés par la maîtrise d'ouvrage, modifiant sensiblement le projet initial.

Parmi les demandes de la MOA, l'ajout d'un plus grand nombre de jalousies, au-delà de ce qui était prévu, a suscité des craintes sur le plan économique. Ces jalousies avaient pour but d'améliorer le confort des usagers, en particulier dans un bureau jugé défavorable en termes de conditions thermiques. Des arbitrages financiers ont dû être faits. En parallèle, la MOA a insisté pour automatiser ces ouvertures, bien que l'équipe de maîtrise d'œuvre ait proposé une approche différente, consistant à former les usagers à manipuler eux-mêmes les dispositifs en fonction de leurs besoins. Ce choix d'automatisation a limité l'implication des usagers sur la prise en main des systèmes.

D'un point de vue technique, d'autres choix initiaux ont été modifiés ou adaptés. Les groupes froids, prévus sur la toiture pour limiter l'impact

acoustique dans les bureaux, n'y ont finalement pas été installés. Les rejets des laboratoires, évacués par des conduits "sorbonne" en façade, ont soulevé des inquiétudes quant à leur possible recirculation dans le canyon dépressionnaire, mais les retours d'expérience après livraison ont rassuré l'équipe sur ce point. Pour répondre à la double exigence de luminosité et de ventilation dans le cas où le canyon serait fermé en partie haute, des jalousies ont été ajoutées entre bureaux et couloirs. Cependant, cette modification a conduit à des plaintes sur des nuisances sonores provenant des couloirs. Des encadrements aux jalousies ont également été ajoutés pour éviter les infiltrations d'eau en cas de pluie chassante, et des optimisations de la GTC ont été mises en place pour gérer automatiquement les ouvertures en fonction de la pluviométrie, de la température ou de l'hygrométrie dans certaines zones.

À la livraison, plusieurs problèmes ont compliqué la prise en main du bâtiment. La gestion technique centralisée, essentielle pour piloter les jalousies selon des paramètres climatiques, ne fonctionnait pas. Cela a empêché l'ouverture automatique des jalousies du canyon pendant quelques jours et les usagers ont eu du mal à s'approprier les dispositifs, notamment pour ventiler leurs espaces. Les visites de Mme Pacot ont montré que, bien que le bâtiment offre un confort thermique globalement satisfaisant, les usagers ouvraient peu les fenêtres, ce qui accentue la sensation de chaleur.

Pour mieux comprendre ces difficultés, un retour d'expérience a été mené avec le bureau d'étude qualité environnementale du bâtiment et a démontré que malgré un ressenti thermique parfois chaud, les ouvertures étaient rarement utilisées.

Avec le recul, Mme Pacot estime que si c'était à refaire, elle ne changerait pas la conception globale du projet, qu'elle juge réussie, mais mettrait davantage l'accent sur l'accompagnement des usagers. Une meilleure intégration des usagers, dès la conception et à travers des

formations ou des explications approfondies lors de la livraison, aurait probablement atténué les résistances observées et favorisé une utilisation optimale de ce bâtiment innovant. Pour elle, ce projet met en lumière l'importance d'associer les usagers à toutes les étapes dans des démarches architecturales novatrices.

2.4.2 Point de vue du gestionnaire de site

Personne interrogée : Mr Samuel Lauret, gestionnaire de site au CIRAD

Retour d'expérience : Les bâtiments étudiés ont fait l'objet de plusieurs enquêtes de confort, révélant un taux de brassage d'air satisfaisant et conforme au cahier des charges. Mr Lauret est satisfait du projet qui a fait l'objet d'études PREBAT. Il précise que les jalousies automatiques s'ouvrent dès qu'une différence de 2°C est constatée entre l'intérieur et l'extérieur, à condition que la température intérieure dépasse 25°C. Cependant, en cas de pluie accompagnée de vents de plus de 1,5 m/s, ou de vents seuls excédant 4,5 m/s, les jalousies se ferment. Le système peut également être forcé en cas de conditions cycloniques.

Les usagers peuvent télétravailler jusqu'à 20 % du temps afin d'éviter les périodes les plus chaudes. M. Lauret souligne que les études menées avec le laboratoire Eiffel ont conduit à une amélioration de la conception du canyon dépressionnaire. Cependant, quelques limitations ont été relevées, comme le manque de communication auprès des usagers et/ou leur intérêt pour le projet : seulement 13 d'entre eux sur 70 ont participé aux études de confort précédentes. Il regrette aussi le faible niveau d'étanchéité pour les jalousies, et des problèmes d'étanchéité avec des joints déplacés. Certains dysfonctionnements ont été observés avec les jalousies automatiques, dont certaines ne fonctionnent plus correctement, pointant vers un matériel non pérenne. Pour une future révision, il aurait préféré des volets roulants occultants en cas de fortes pluies. Quelques plaintes liées au bruit et à la poussière ont également été signalées, notamment pendant les travaux et en l'absence de végétation autour des bâtiments. Un sol souple a été installé dans les bureaux afin de gérer les éventuelles infiltrations d'eau.

3 ETUDE AERAULIQUE

Nos mesures visaient à quantifier le **potentiel aéraulique maximal** pouvant être atteint **dans le système dépressionnaire**, pour différents scénarios d'admission d'air.

3.1 Métrique de mesures aérauliques

Pour comparer les scénarios entre eux, la métrique principale utilisée est sous forme d'un coefficient adimensionnel correspondant au rapport entre la vitesse de vent mesurée à 1 point donné dans le puits/patio ou canyon dépressionnaire, et la vitesse de vent de référence issue d'une station météorologique.

$$C = \frac{\text{Vitesse de vent mesurée en 1 point dans le puits/patio ou canyon dépressionnaire } [V_a \text{ en m/s}]}{\text{Vitesse de vent de référence } [V_{\text{référence}} \text{ en m/s}]}$$

Les coefficients adimensionnels obtenus permettent d'évaluer l'efficacité relative du bâtiment à capter le vent extérieur et à le faire circuler jusqu'à l'intérieur du canyon. **La valeur seuil du coefficient adimensionnel est fixée à 0,15 : au-delà, elle est considérée comme correcte, tandis qu'en deçà, elle reste faible.**

Pour que les résultats soient représentatifs, il fallait que la vitesse de vent de référence soit supérieure à 2.5 m/s pendant une période significative, et que la direction du vent n'oscille pas de +/- 15° sur la période de mesures.

Plusieurs scénarios ont été étudiés en fonction du cas d'études. Les campagnes de mesures pour chaque scénario ont duré 30 min et les coefficients adimensionnels ont été calculés sur les 10min de chaque

campagne pendant lesquelles la vitesse de vent extérieur était la plus importante (moyenne glissante).

3.2 Matériel de mesure

Les données vitesses et direction du vent de référence ont été mesurées grâce à un combiné anémomètre-girouette (WSD 011-1 WINDVISU) et un enregistreur sans fil (NAVIS WL12/D) placé en émergence par rapport à la hauteur maximale du système.



NAVIS WL12/D

Température		Direction du vent		Vitesse du vent	
Étendue de mesure	-30 °C à +60 °C	Étendue de mesure	0° à 359°	Étendue de mesure	0,6 à 50 m/s
Précision	±1 °C	Précision	±2,5°	Précision	±2,5 %
Résolution	1 °C	Résolution	1°	Résolution	0,1 m/s

Les données vent dans le système dépressionnaire ont été mesurées grâce à des anémomètres AIRDISTSYS 5000.

Pour certaines mesures de vitesse d'air intérieur, nous avons utilisé des anémomètres à fil chaud FKIMO HQ 210. Ils évaluent la vitesse de l'air au moyen un fil chauffé par effet Joule (faible courant électrique), et le passage d'un flux d'air va le refroidir par convection.

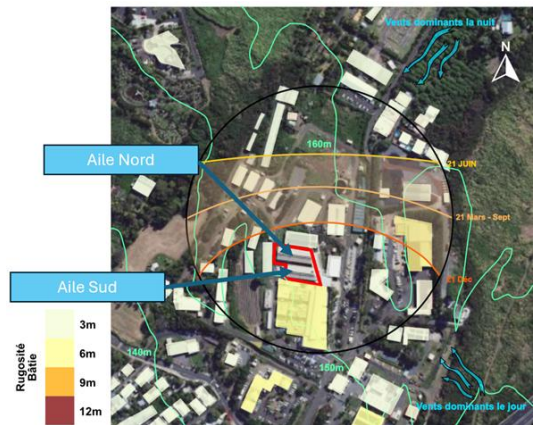
Projet ASPIRHAUT- OMBREE

Le refroidissement modifie la résistance électrique du fil, ce qui permet d'évaluer précisément la vitesse et le débit d'un flux d'air, même très faible (mesure en infiltrométrie pour détecter les défauts d'étanchéité dans un bâtiment).



Vitesse		Température		Humidité relative	
Étendue de mesure	0,00 à 5,00 m/s	Étendue de mesure	0 à +50 °C	Étendue de mesure	5 à 95 %HR
Précision	±0,05 m/s	Précision	±0,25 °C	Précision	±1,8 %HR
Résolution	0,01 m/s	Résolution	0,1 °C	Résolution	0,1 %HR

L'aile 4 (Aile Sud) et l'aile 5 (Aile Nord) du CIRAD fonctionnent en ventilation naturelle grâce à un **canyon dépressionnaire**. Nous sommes intervenus sur site, en période d'occupation, entre juin 2024 et juillet 2024. Il a donc fallu composer avec la présence des usagers, ce qui a parfois impliqué de les déranger, notamment pour ouvrir les fenêtres ou accéder à certaines zones, ainsi que pour répondre à leurs questions.



Chacun des canyons dépressionnaires alimente des bureaux individuels ou petits open-space.

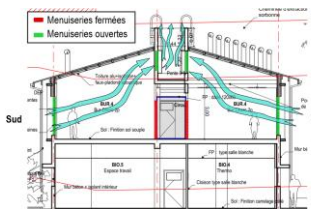
Nous avons tout d'abord installé la station de référence sur le toit des bâtiments, en le faisant émerger au maximum par rapport à la hauteur du toit et du canyon. Nous avons ensuite divisé en deux zones chaque canyon afin de positionner **2 x 4** anémomètres équidistants sur toute sa longueur. Nous n'avions pas suffisamment d'anémomètres pour pouvoir enregistrer la totalité des points mesures en une seule campagne.



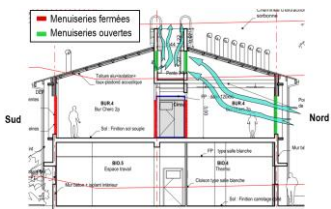
4 scénarios ont été étudiés pour ce site :

- 1 : Baies de façades Nord et Sud **ouvertes**, Baies des coursives **fermées** ;
- 2 : Baies des façades Nord **ouvertes**, Baies des façades Sud **fermées**, Baie des coursives **fermées** ;
- 3 : Baies des façades Sud **ouvertes**, Baies des façades Nord **fermées**, Baie des coursives **fermées** ;
- 4 : Baies de façades Nord et Sud **ouvertes**, Baies des coursives **ouvertes**.

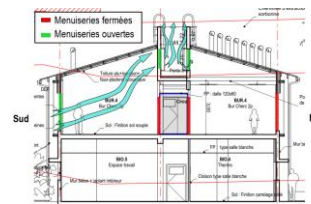
Cas 1 : Baies de façades Nord et Sud **ouvertes**
Baies des coursives **fermées**



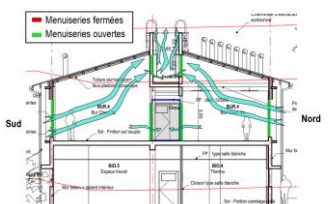
Cas 2 : Baies des façades Nord **ouvertes**
Baies des façades Sud **fermées**
Baie des coursives **fermées**



Cas 3 : Baies des façades Sud **ouvertes**
Baies des façades Nord **fermées**
Baie des coursives **fermées**



Cas 4 : Baies des façades Nord et Sud **ouvertes**
Baies des coursives **ouvertes**

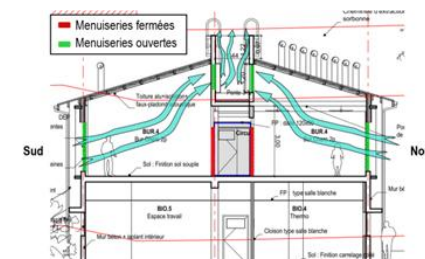


3.3 Résultats

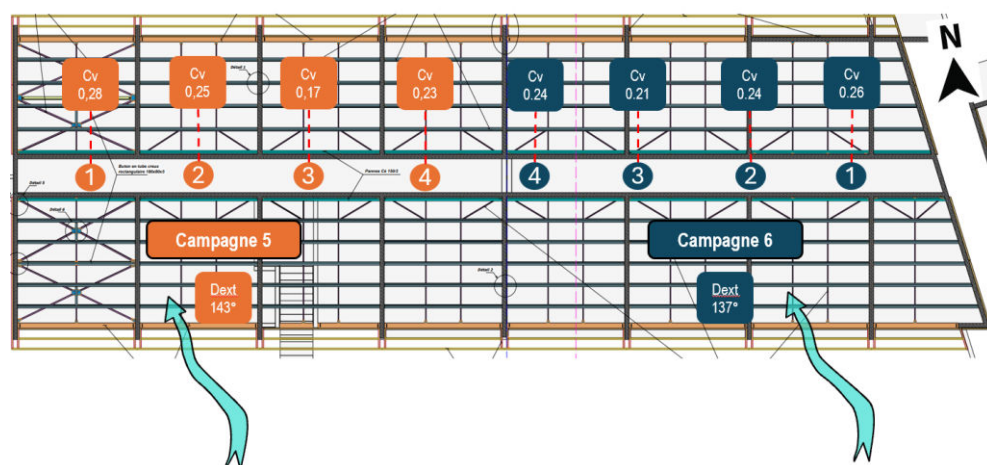
3.3.1 Cas 1

Baies de façades Nord et Sud **ouvertes**

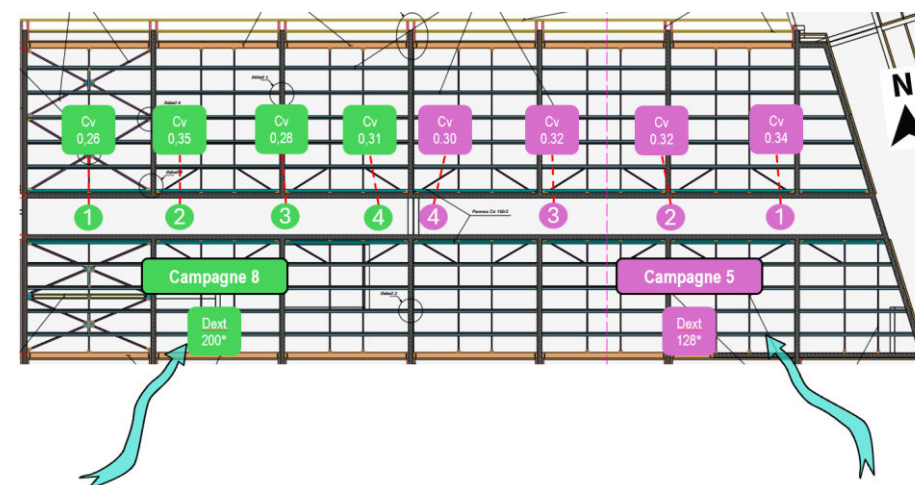
Baies des coursives **fermées**



Aile Nord



Aile Sud



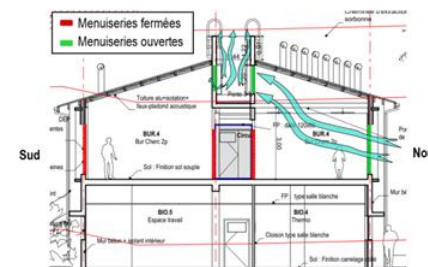
Commentaires : On observe des coefficients adimensionnels compris entre 0.17 et 0.28 pour l'aile Nord ; et de 0.26 et 0.34 pour l'aile Sud. Ces coefficients adimensionnels sont globalement élevés démontrant une bonne dynamique des puits dépressionnaires dans cette configuration.

3.3.2 Cas 2

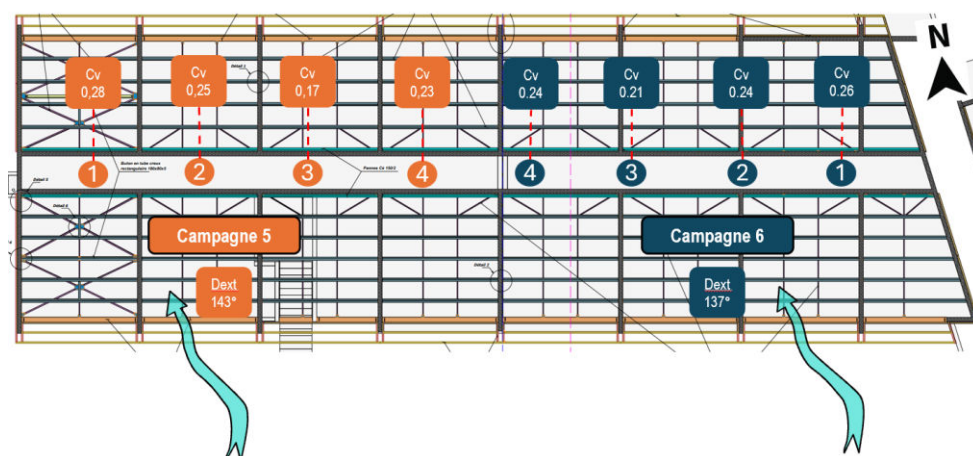
Baies des façades Nord **ouvertes**

Baies des façades Sud **fermées**

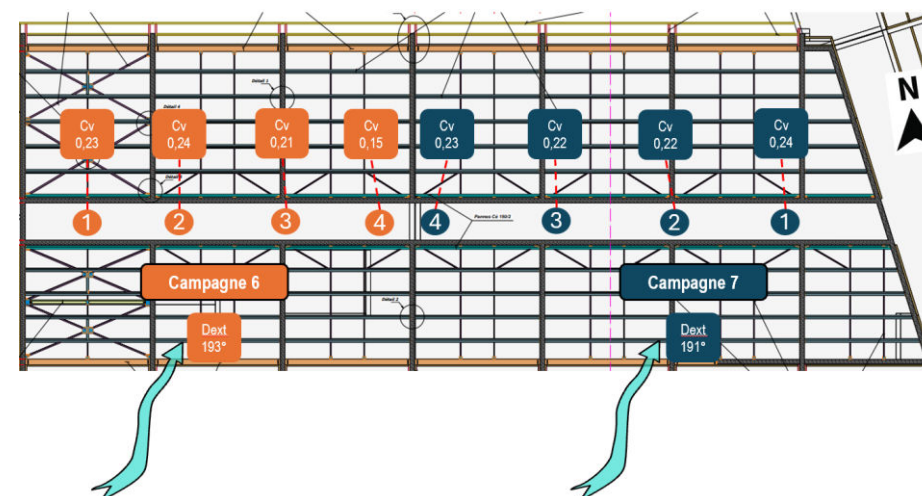
Baie des coursives **fermées**



Aile Nord



Aile Sud



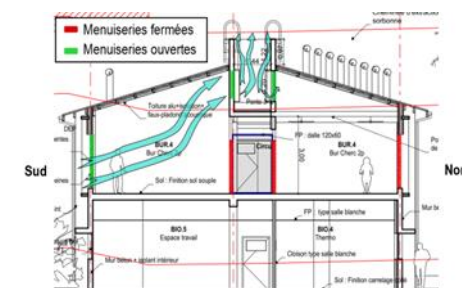
Commentaires : On observe des coefficients adimensionnels compris entre 0.17 et 0.28 pour l'aile Nord ; et de 0.15 et 0.24 pour l'aile Sud. Ces coefficients adimensionnels sont globalement élevés démontrant une bonne dynamique des puits dépressionnaires dans cette configuration. L'impact de la fermeture des baies au Sud impacte légèrement les renouvellements d'air dans les locaux. Les bureaux situés en partie Nord des ailes auront des vitesses d'air plus importantes que les bureaux situés au Sud.

3.3.3 Cas 3

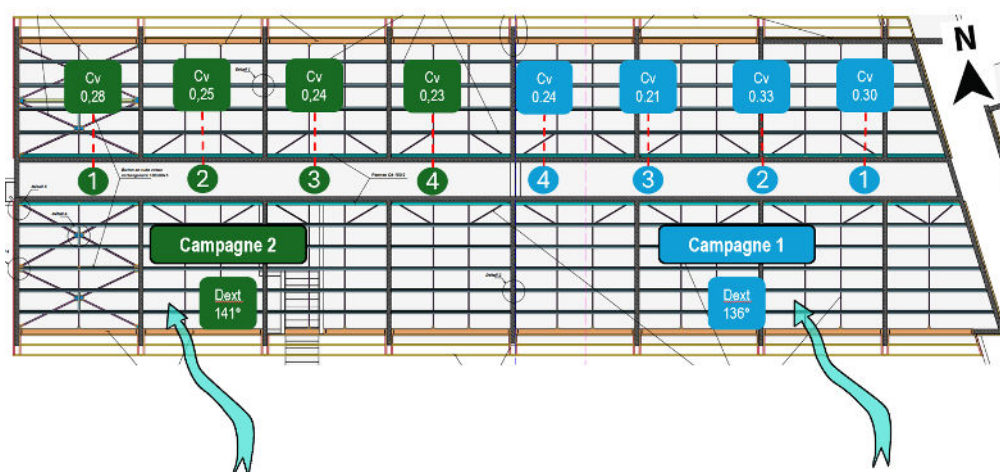
Baies des façades Sud **ouvertes**

Baies des façades Nord **fermées**

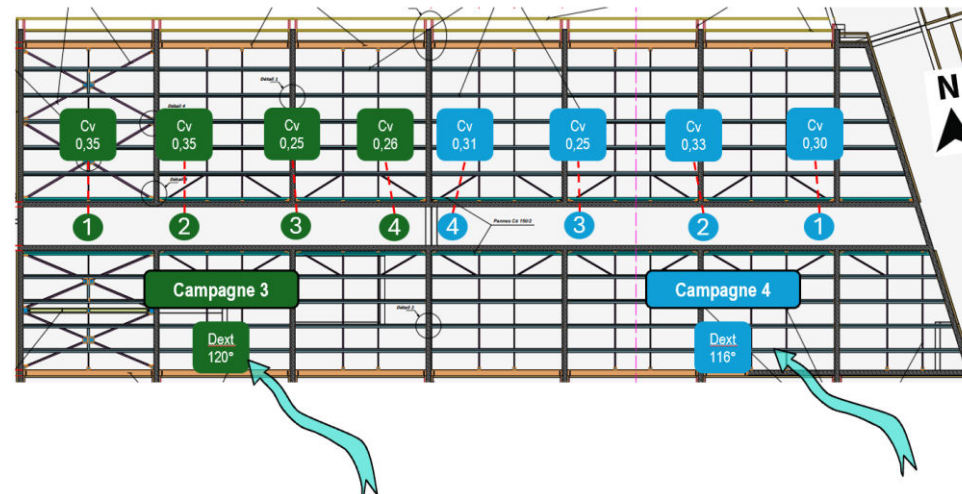
Baie des coursives **fermées**



Aile Nord



Aile Sud

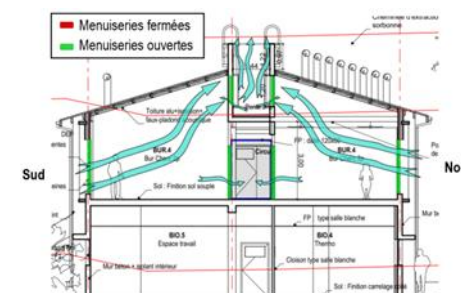


Commentaires : On observe des coefficients adimensionnels compris entre 0.21 et 0.33 pour l'aile Nord ; et de 0.25 et 0.35 pour l'aile Sud. Ces coefficients adimensionnels sont globalement élevés démontrant une bonne dynamique des puits dépressionnaires dans cette configuration. L'impact de la fermeture des baies au Nord impacte légèrement les renouvellements d'air dans les locaux. Les bureaux situés en partie Sud des ailes auront des vitesses d'air plus importantes que les bureaux situés au Nord.

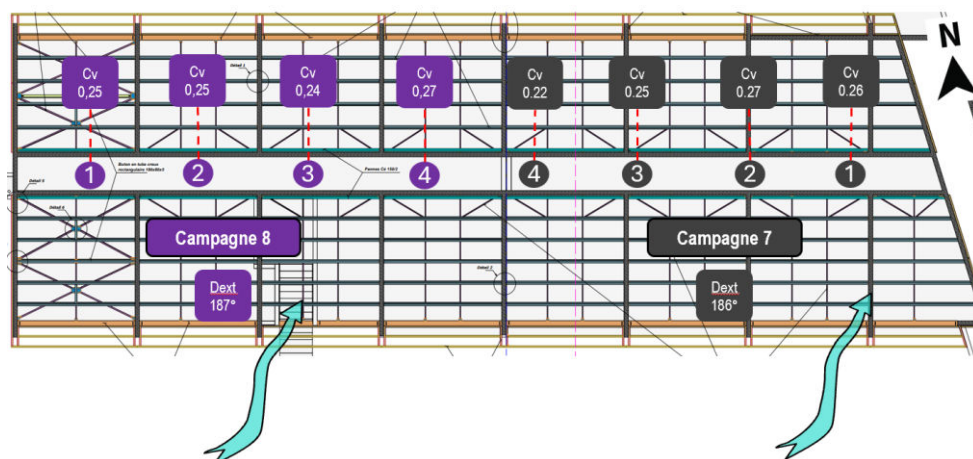
3.3.4 Cas 4

Baies des façades Nord et Sud **ouvertes**

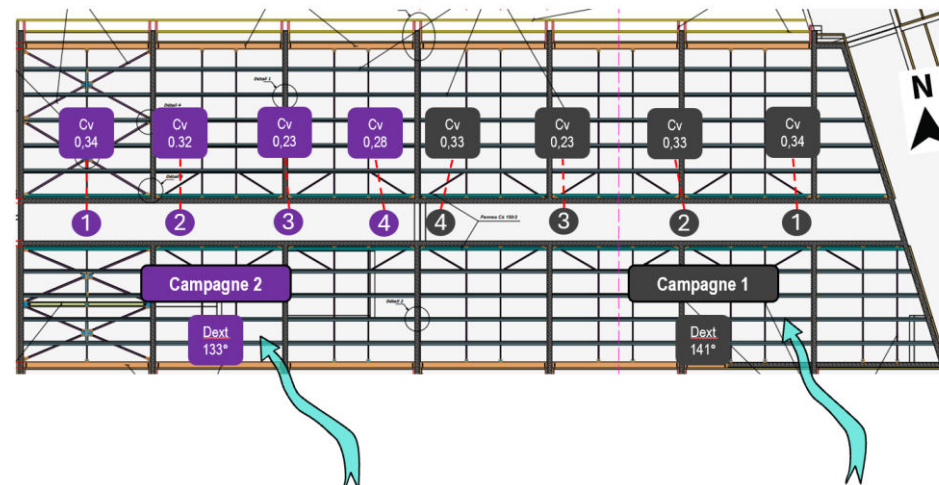
Baies des coursives **ouvertes**



Aile Nord



Aile Sud



Commentaires : On observe des coefficients adimensionnels compris entre 0.22 et 0.27 pour l'aile Nord ; et de 0.23 et 0.34 pour l'aile Sud. Ces coefficients adimensionnels sont globalement élevés démontrant une bonne dynamique des puits dépressionnaires dans cette configuration. En mode tout ouvert (avec notamment les baies des circulations intérieures), l'irrigation intérieure des volumes sera identique par rapport aux autres configurations précédemment testées.

Il est à noter que certaines pertes de charge peuvent être générées par la présence de protections solaires type casquettes sur les jalousies à l'intérieur du canyon ainsi que par la présence d'un onduleur de centrale solaire, ce qui aurait un impact sur les données mesurées.

4 ETUDE CONFORT

4.1 Méthodologie

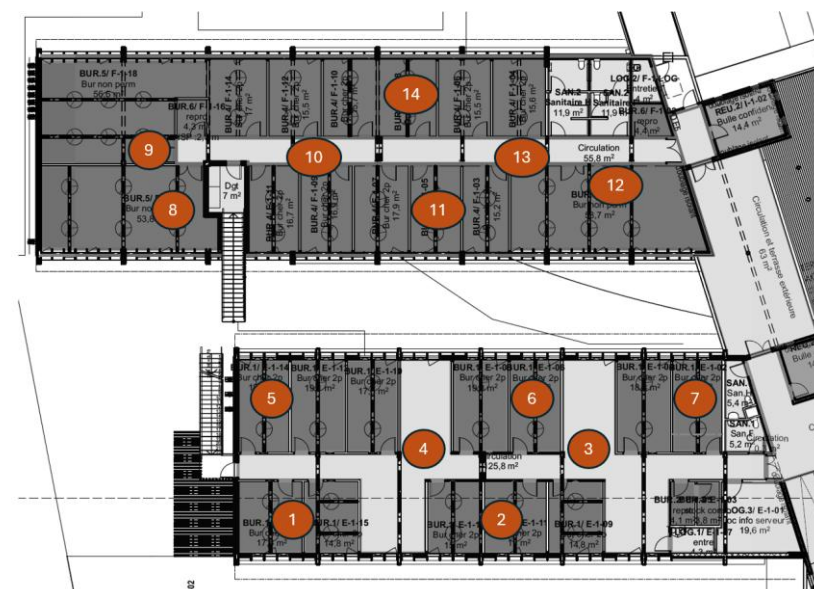
En parallèle de ces mesures aérauliques, des **capteurs de température et humidité relative** ont été installés dans plusieurs bureaux de chaque aile. Ces données ont été suivies sur une année et permettent d'**obtenir une cartographie de l'évolution hygrothermique** à l'intérieur de quelques bureaux types au CIRAD.

Nous avons utilisé des capteurs enregistreurs température d'air / humidité relative de type 174H de la marque TESTO, programmés pour enregistrer les données sur un pas de temps de 10 minutes.



Set testo 174H

La campagne de mesure a commencé 05 mars 2024 et s'est terminée le 04 mars 2025. Celle-ci couvre donc bien la période d'été austral (avec des gammes de températures élevées) et la période hivernale (avec des gammes de températures moindres). Il a été placé **14 capteurs enregistreurs** dans les bureaux et espace de circulation/vie de ce bâtiment.



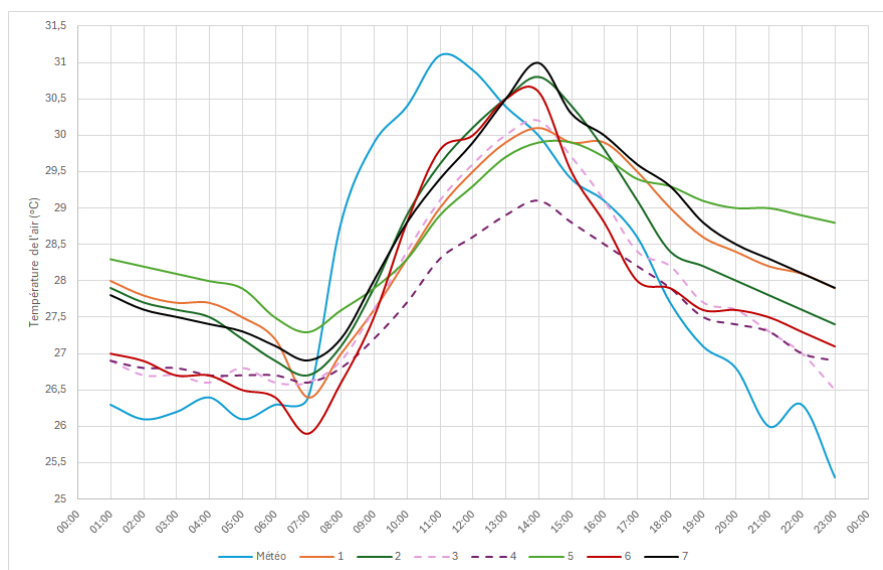
Emplacement des capteurs

4.2 Résultats

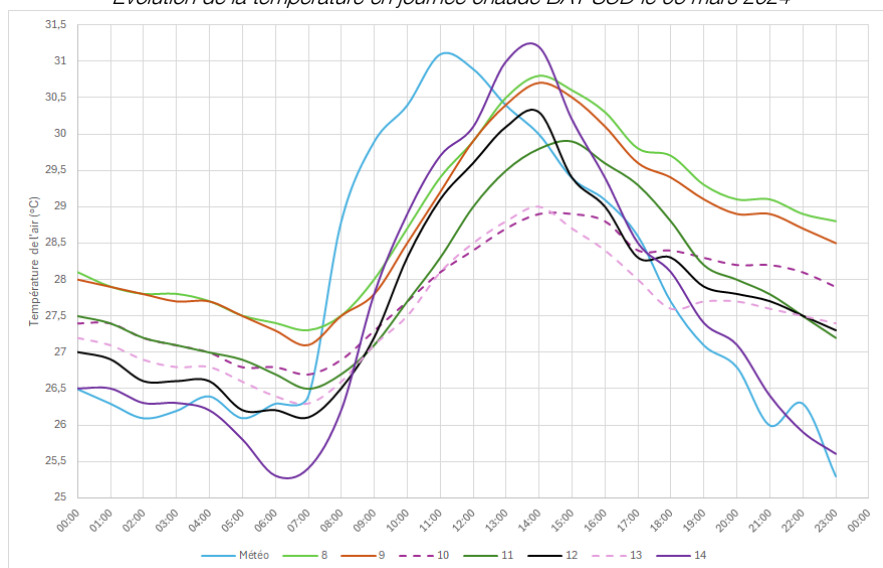
Voici les résultats de cette campagne de mesure du confort en pourcentage de valeur en dessous de 20°C et au-dessus de 28°C, 30°C et 32°C :

CAMPAGNE ESTIVALE (01/11 -> 30/04)				
Nom local	<20°C	>28°C	>30°C	>32°C
Donée Météo	0,00%	5,28%	1,23%	0,02%
Bureau 1	0,00%	39,63%	9,10%	0,08%
Bureau 2	0,00%	39,95%	12,63%	0,61%
Couloir 3	0,00%	36,06%	8,47%	0,37%
Couloir 4	0,00%	31,46%	2,11%	0,00%
Bureau 5	0,00%	47,74%	13,89%	0,11%
Bureau 6	0,00%	36,57%	7,67%	0,08%
Bureau 7	0,00%	40,26%	10,93%	0,68%
Bureau 8	0,00%	49,91%	15,58%	0,59%
Bureau 9	0,00%	42,16%	10,21%	0,35%
Couloir 10	0,00%	39,18%	3,62%	0,00%
Bureau 11	0,00%	41,56%	11,88%	0,59%
Bureau 12	0,00%	40,86%	11,71%	0,49%
Couloir 13	0,00%	37,53%	4,01%	0,00%
Bureau 14	0,00%	39,47%	14,37%	1,92%
CAMPAGNE HIVERNALE (01/05 -> 31/10)				
Nom local	<20°C	>28°C	>30°C	>32°C
Donée Météo	2,61%	0,19%	0,00%	0,00%
Bureau 1	4,61%	0,29%	0,00%	0,00%
Bureau 2	7,44%	0,61%	0,00%	0,00%
Couloir 3	0,91%	0,49%	0,01%	0,00%
Couloir 4	0,82%	0,00%	0,00%	0,00%
Bureau 5	0,55%	0,09%	0,00%	0,00%
Bureau 6	4,67%	0,67%	0,00%	0,00%
Bureau 7	1,59%	0,62%	0,00%	0,00%
Bureau 8	2,28%	0,38%	0,00%	0,00%
Bureau 9	2,42%	0,19%	0,00%	0,00%
Couloir 10	0,38%	0,00%	0,00%	0,00%
Bureau 11	3,41%	0,37%	0,00%	0,00%
Bureau 12	5,43%	0,47%	0,00%	0,00%
Couloir 13	1,41%	0,00%	0,00%	0,00%
Bureau 14	5,72%	1,37%	0,02%	0,00%

Résultats de la campagne de mesure confort Bâtiment CIRAD



Evolution de la température en journée chaude BAT SUD le 06 mars 2024



Evolution de la température en journée chaude BAT NORD le 06 mars 2024

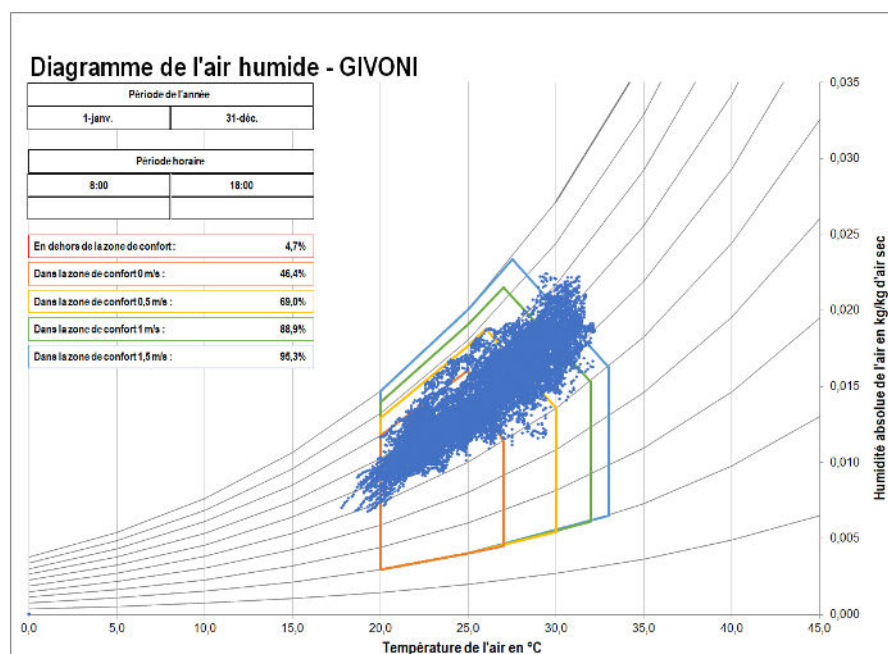
Dans un premier temps, on observe des différences importantes entre le fonctionnement thermique dans les couloirs (point 3, 4, 10 et 13) et les autres capteurs situés dans des bureaux. Dans les couloirs de circulation, les courbes d'évolution de températures sont plus lisses et montrent certainement une certaine inertie du bâtiment et une occupation bien moindre que dans les bureaux engendrant des charges thermiques internes quasi-nulles. Ceci explique ces différences. On notera que le couloir 3 est un peu plus chaud que les autres, ceci peut être dû à des ouvertures plus importantes des bureaux au droit de cet espace ou à des charges internes plus importantes que dans les autres couloirs (équipements électriques).

Pour les bureaux, les gammes de températures sont en ordre de grandeur légèrement supérieures aux températures extérieures avec un déphasage de 2/3 heures révélant l'impact du « rayonnement froid » de la structure maçonnée du bâtiment. Le confort est globalement atteint avec des températures n'excédant que très ponctuellement 32°C. Néanmoins, le pourcentage de points au-dessus de 28°C est important comparé aux conditions extérieures (environ 40% des points au lieu de 5%) en période estivale, montrant un manque d'efficacité dans le renouvellement d'air. On note également que le point 14, bureau situé au Nord de l'Aile Nord est plus bien chaud que les autres. Ceci est sans nul doute dû à l'absence d'ombre portée comparé aux autres façades.

On observe également des températures relativement basses en hiver avec une proportion non négligeable de points en dessous de 20°C (jusqu'à 7% du temps).

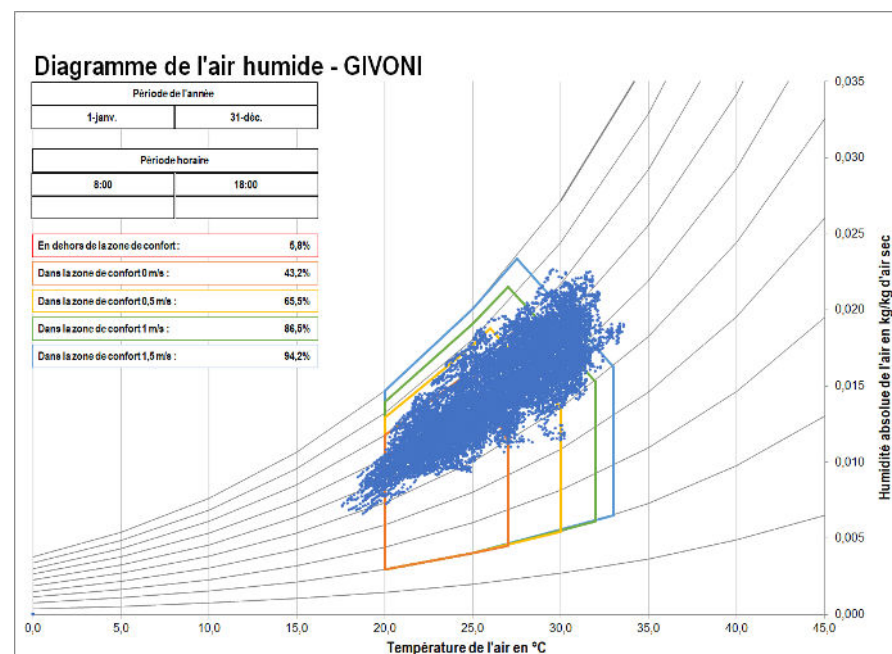
Les diagrammes de Givoni sont une représentation graphique des données de la campagne de mesure uniquement sur la période d'occupation du bâtiment CIRAD entre 8h et 18h sur une année quasi complète.

Point de mesure 1 – Bureau 1



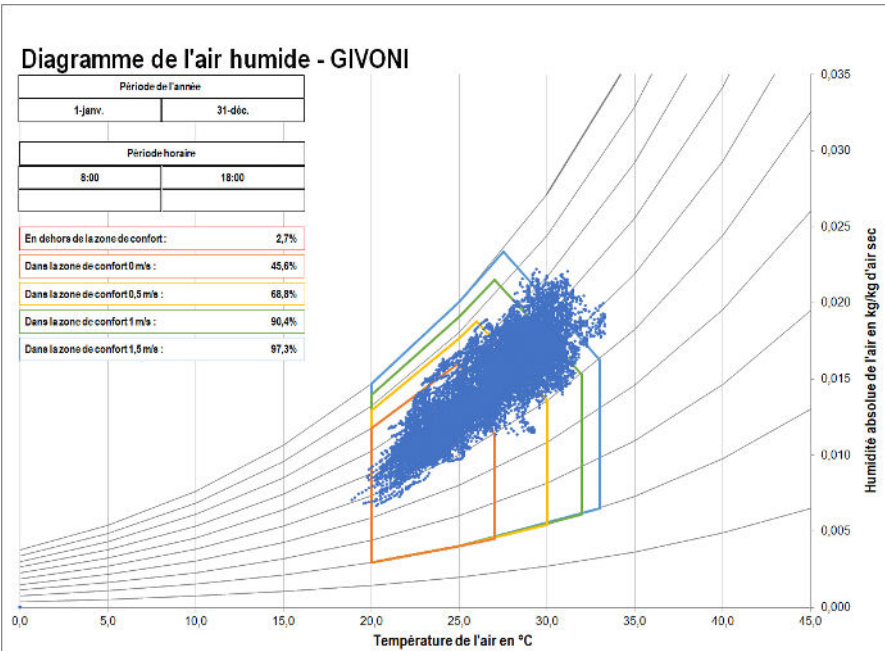
On constate que le confort selon Givoni zone 1m/s est atteint pendant 88,9% du temps sur l'année en occupation ; et de 95,3% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 2 – Bureau 2



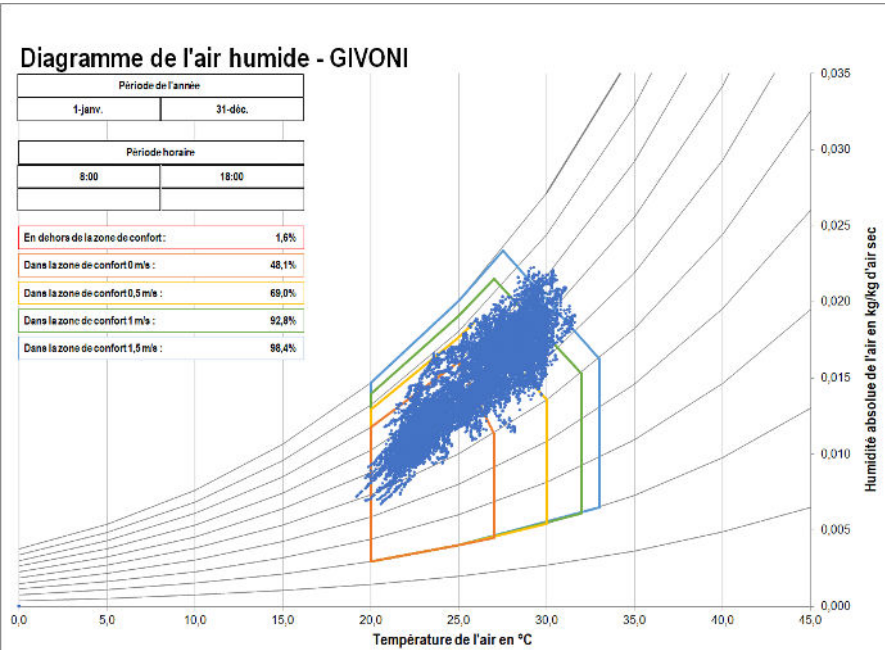
On constate que le confort selon Givoni zone 1m/s est atteint pendant 86,5%% du temps sur l'année en occupation ; et de 94,2% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 3 – Couloir 3



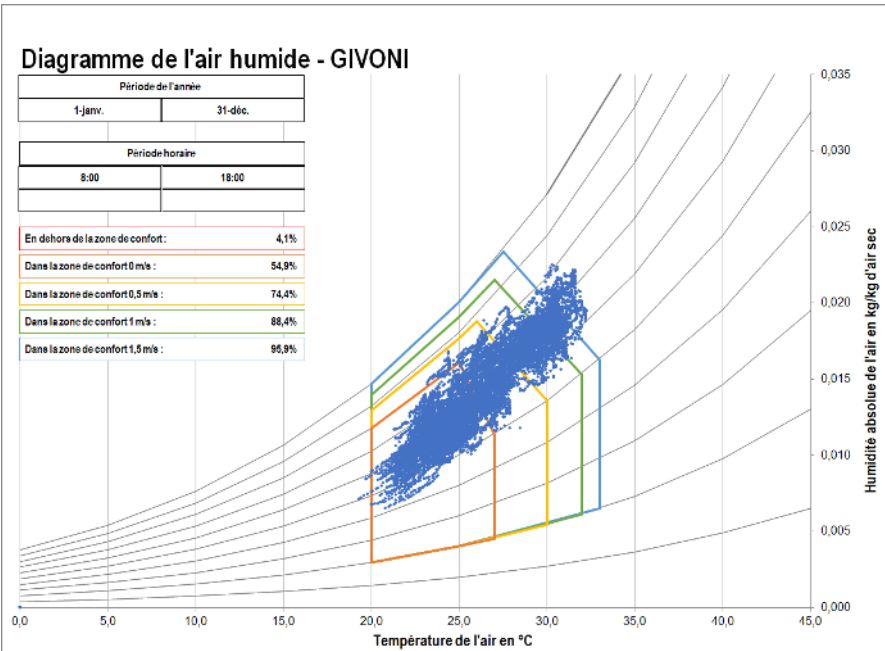
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 90,4% du temps sur l'année en occupation ; et de 97.3% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 4 – Couloir 4



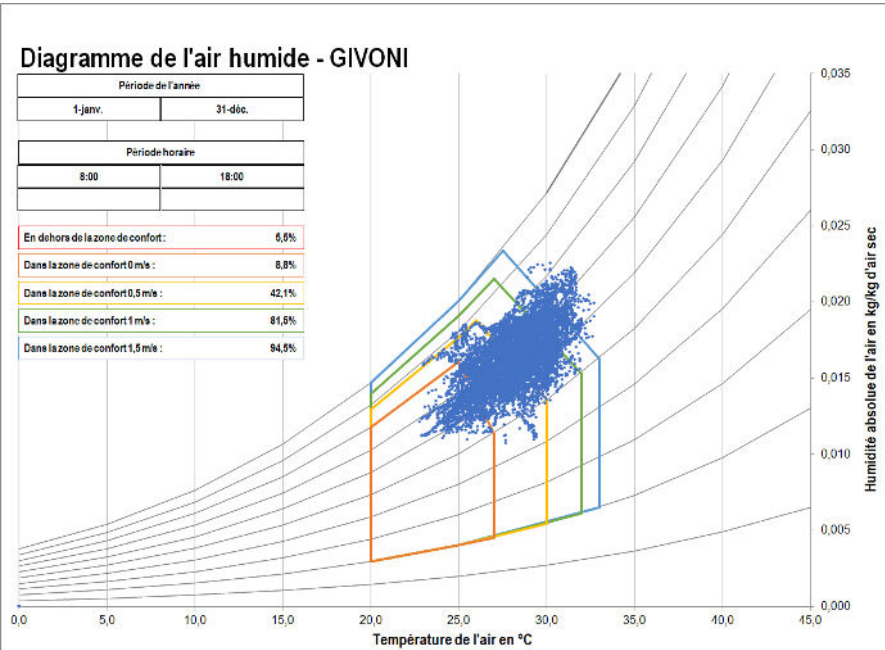
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 92,8% du temps sur l'année en occupation ; et de 98,4% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 5 – Bureau 5



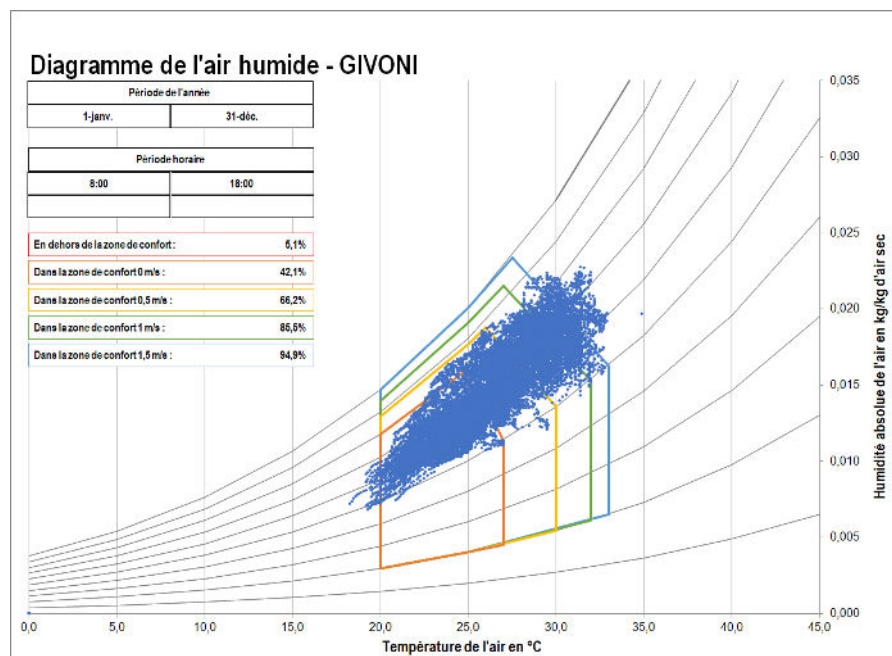
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 88,4% du temps sur l'année en occupation ; et de 95,9% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 6 – Bureau 6



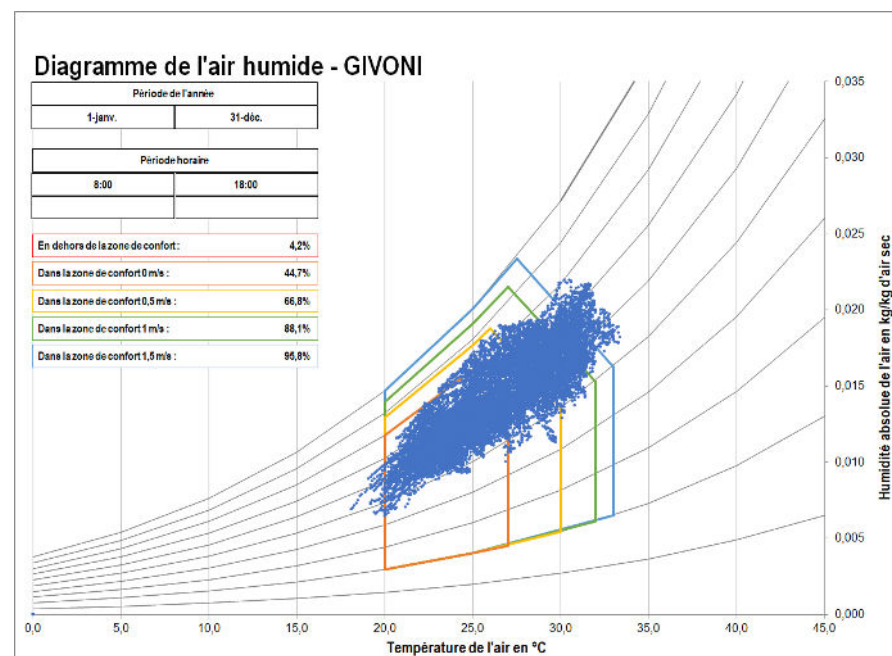
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 81,5% du temps sur l'année en occupation ; et de 94,5% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 7 – Bureau 7



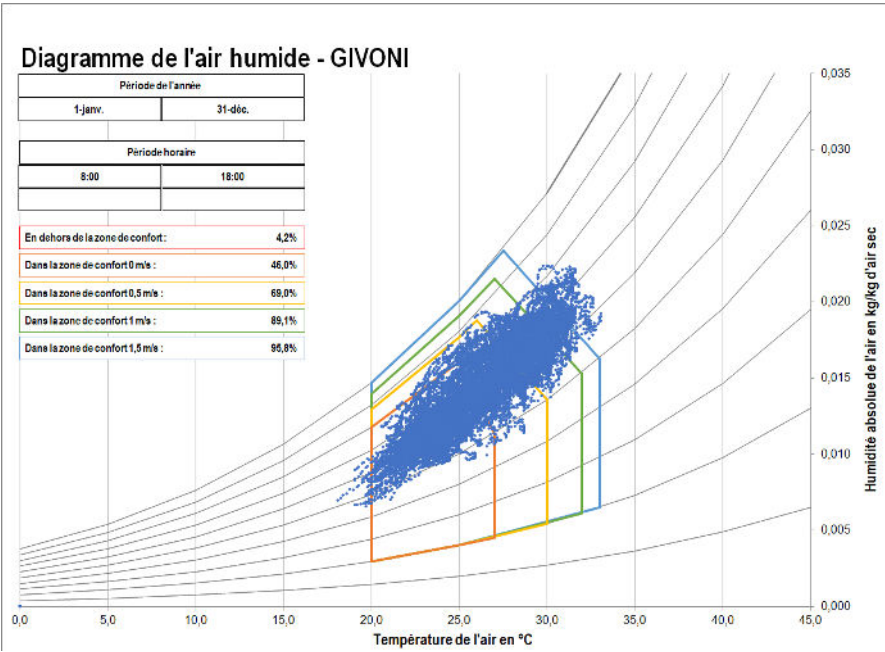
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 85,5% du temps sur l'année en occupation ; et de 94,9% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 8 – Bureau 8



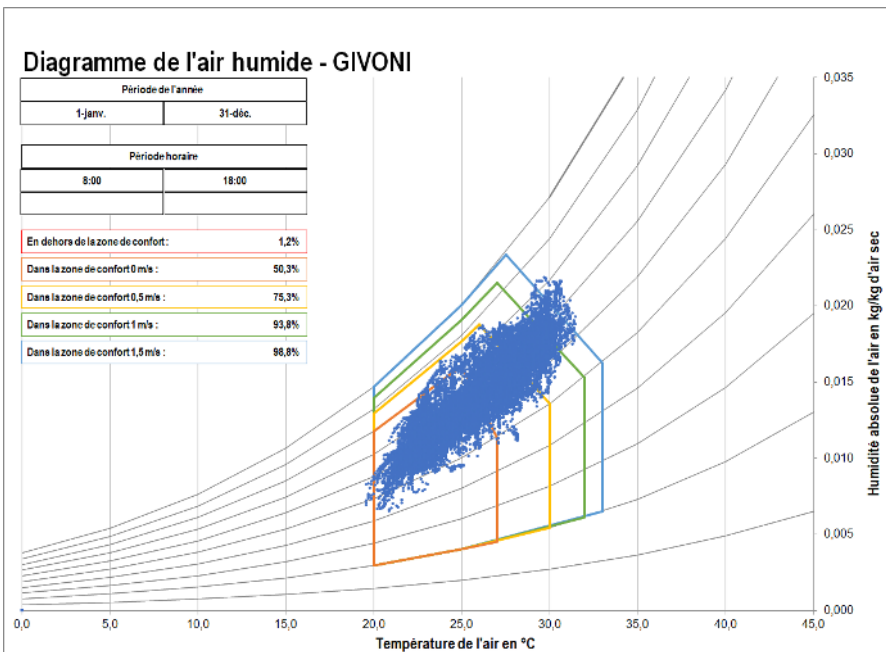
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 88,1% du temps sur l'année en occupation ; et de 95,8% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 9 – Bureau 9



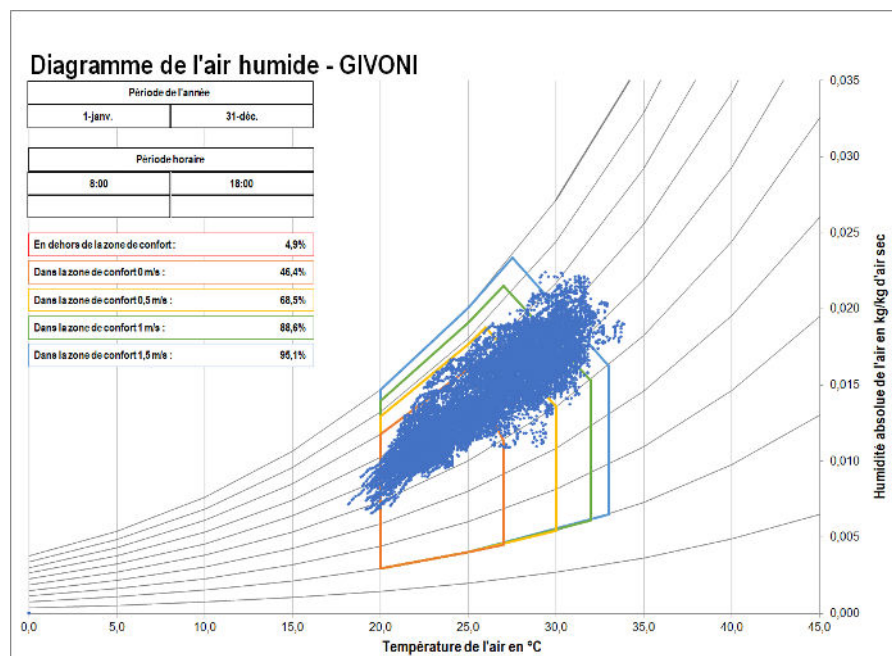
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 89,1% du temps sur l'année en occupation ; et de 95,8% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 10 – Couloir 10



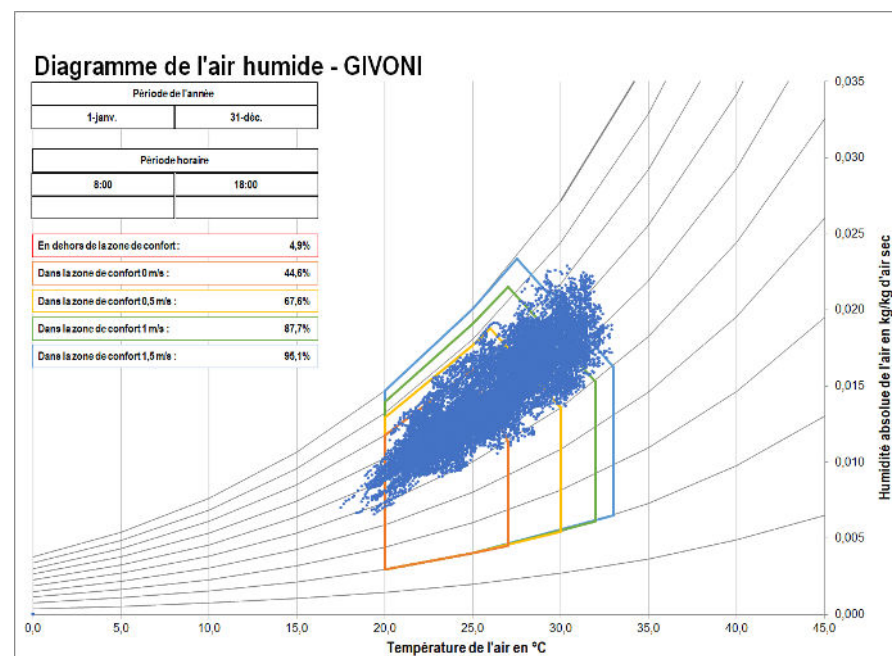
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 93,8% du temps sur l'année en occupation ; et de 98,8% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 11 – Bureau 11



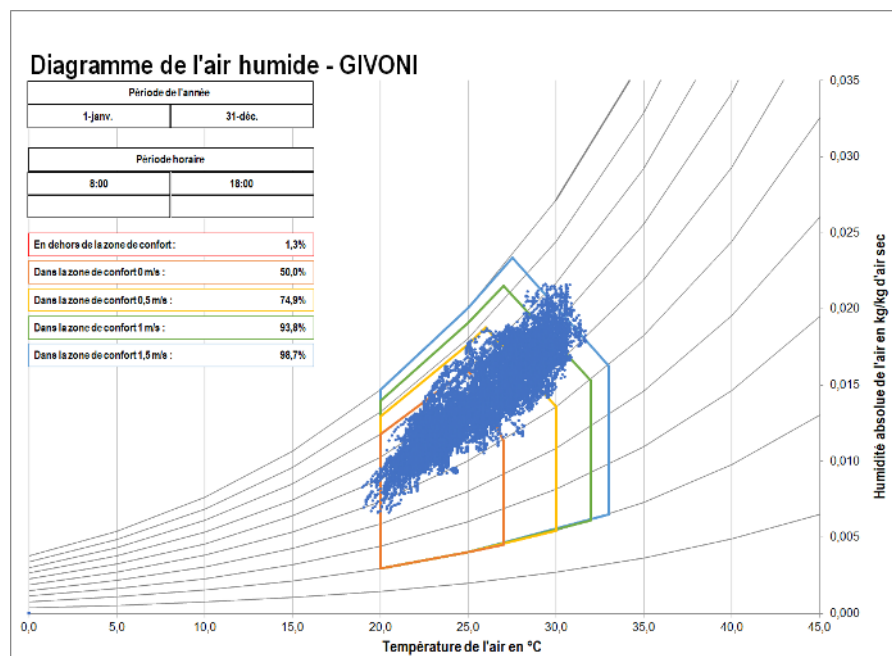
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 88,6% du temps sur l'année en occupation ; et de 95,1% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 12 – Bureau 12



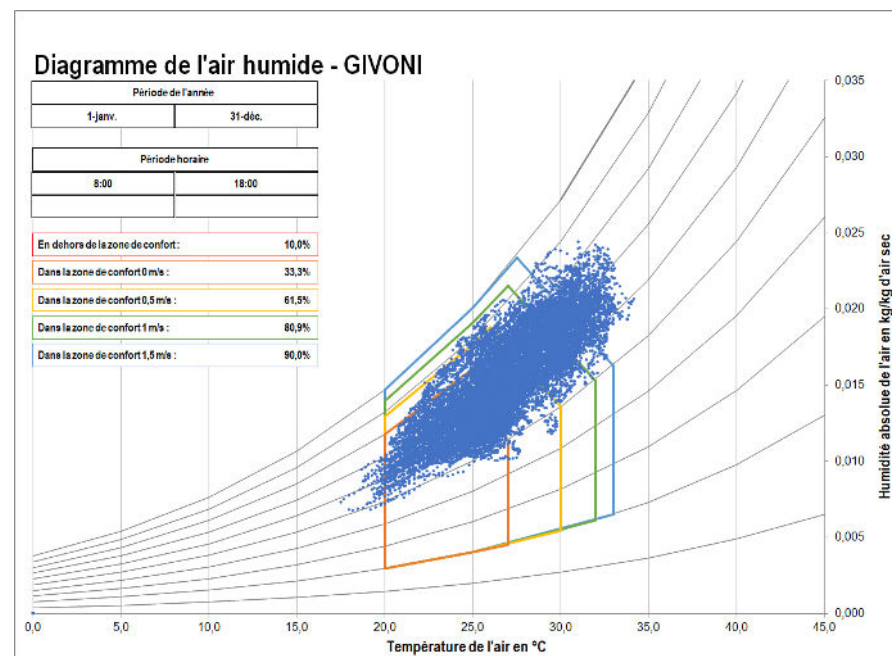
On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 87,7% du temps sur l'année en occupation ; et de 95,1% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 13 – Couloir 13



On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 93,8% du temps sur l'année en occupation ; et de 98,7% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

Point de mesure 14 – Bureau 14



On constate que le confort selon Givoni zone 1 m/s est atteint pendant 80,9% du temps sur l'année en occupation ; et de 90,0% pour la zone de Givoni 1,5 m/s. Les gammes de températures excèdent peu 32°C.

4.3 Conclusion

Le diagnostic du confort thermique du bâtiment du CIRAD montre que la conception aérothermique permet aux usagers d'être en situation de confort. La protection de l'enveloppe est performante pour limiter le rayonnement solaire et les renouvellements d'air en partie suffisants pour évacuer l'ensemble des surcharges thermiques.

Des différences entre les conditions météorologiques et l'intérieur du bâtiment montrent que le bâtiment peut être amélioré. Nous constatons que le nombre d'heures au-dessus de 28°C et 30°C est, en ordre de

grandeur, bien supérieur entre l'intérieur des locaux et les températures extérieures en période estivale. Le confort peut donc être renforcé en travaillant :

- ➔ Bonne gestion des ouvertures en période estivale
- ➔ Augmentation des ouvertures à l'extraction
- ➔ Limitation des pertes de charge aéraulique dans le puits dépressionnaire (présence de casquette + onduleur de la centrale solaire)

5 ETUDE ENERGETIQUE

5.1 Méthodologie

Afin de quantifier l'intérêt énergétique des systèmes dépressionnaires, nous avons étudié au moyen de simulations thermiques dynamiques, les gains entre le cas d'étude actuel fonctionnant en ventilation naturelle via canyon dépressionnaire par rapport à ce même bâtiment qui aurait été entièrement climatisé. A notre connaissance, cet aspect n'a pas encore été traité dans la littérature existante, les retours d'expérience sur ce type d'architecture étant déjà peu nombreux.

Les études de simulation thermique dynamique (STD) ont été réalisées grâce au moteur de calcul EnergyPlus et à l'interface graphique SketchUp fonctionnant avec le plug-in Euclid.

La STD, en modélisant numériquement un projet proche du projet réel, et en utilisant un fichier météorologique proche du cas d'étude, permet de calculer l'évolution de l'état thermique et également des besoins frigorifiques sur une année. Elle tient compte de l'enveloppe du bâtiment, des équipements, du comportement des usagers et de la météo.

Les tableaux ci-après résument les caractéristiques des charges internes et des compositions de parois renseignées dans le modèle numérique des bâtiments étudiés du CIRAD.

Type de pièce	Nb personne	Planning occupation	Eclairage	Planning éclairage	Equipement	Planning d'équipement
Bureaux	2	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7	5 W/m²	OFF	75 W/personne	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7
Open-spaces	5	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7	5 W/m²	OFF	75 W/personne	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7
Circulations	1	20% de 8h à 17h, 5j/7	3 W/m²	100% de 8h à 17h, 5j/7	0 W	OFF

	Toiture terrasse	Sol canyon	Toiture tôle	Mur ossature bois	Mur canyon	Jalousie	Ouvrant à la française
Composition (int. → ext.)	Plaque de plâtre Polystyrène 10 cm Dalle béton 16 cm	Dalle béton 16 cm	Faux-plafond acoustique Isolation 10 cm Tôle aluminium	Plaque de plâtre Laine minérale 8 cm Bardage bois	Béton 16 cm	Partie haute : Verre clair 3 mm Partie basse : Lamé aluminium 6 mm marron	Verre clair 4 mm
Caract. thermiques	Rth = 2.38 m².K/W	Rth = 0.06 m².K/W	Rth = 2.31 m².K/W	Rth = 2.21 m².K/W	Rth = 0.06 m².K/W	S ₀ = 0.87 S ₀ = 0	S ₀ = 0.87

Une fois les modèles numériques réalisés, il faut les valider. Pour cela, nous avons comparé les résultats simulés en température/humidités avec les données réellement enregistrées par nos capteurs sur l'année 2024-2025. Les métriques classiquement utilisées dans la littérature pour la validation des modèles numériques de bâtiments sont principalement orientées vers l'analyse des performances énergétiques. Cependant, dans [PAYET, Maäréva. *Simulation du comportement des usagers dans les bâtiments tertiaires à faible consommation énergétique, en zone tropicale*. 2022. Thèse de doctorat. Université de la Réunion.] des indicateurs mieux adaptés à la validation de simulations de température ont été proposés, en les comparant aux métriques conventionnelles. Nous avons donc complété les métriques normalisées NMBE et CV(RMSE) exprimés en % par le calcul du MBE et du MAD exprimés en °C. L'objectif est d'avoir des valeurs de ces métriques les plus faibles possibles, ce qui signifie que les modèles numériques représentent le plus fidèlement possible la réalité.

A partir de ce modèle de référence validé, nous avons comparés différents scénarios de conception de l'enveloppe et d'utilisation des systèmes en imaginant les bâtiments entièrement climatisés :

- 1/ **Conception actuelle (adaptée à la ventilation naturelle)**
 - 1a/ Fonctionnement en ventilation naturelle toute l'année
 - 1b/ Climatisation de novembre à avril à 26°C et 28°C
 - 1c/ Climatisation toute l'année à 26°C et 28°C
- 2/ **Conception adaptée à la climatisation**
 - 2a/ Fonctionnement en ventilation naturelle toute l'année
 - 2b/ Climatisation de novembre à avril à 26°C et 28°C
 - 2c/ Climatisation toute l'année à 26°C et 28°C

Deux conceptions sont donc testées sur 5 scénarios :

- Conception 1 : conception réelle,
- Conception 2 : conception pensée pour la climatisation.

Ci-dessous les hypothèses permettant de simuler une conception adaptée à la climatisation :

	Conception 1	Conception 2
Taux d'infiltration	1,1 vol/h	0,5 vol/h (Conception plus étanche)
Vitrage	Simple vitrage	Double vitrage
Résistance thermique des parois horizontales et verticales	Voir tableau précédent	2,5 m².K/W
Renouvellement d'air	12 vol/h	3 vol/h

Les 5 scénarios sont présentés ci-dessous.

Scénarios pour chaque conception					
	a	b1	b2	c1	c2
Fonctionnement	Vnat	Climatisation de novembre à avril		Climatisation toute l'année	
		Consigne à 26 °C	Consigne à 28 °C	Consigne à 26 °C	Consigne à 28 °C

Nous avons analysé les résultats en termes de confort pour les scénarios en ventilation naturelle, et en termes d'énergie (analyse du besoin frigorifique, c'est-à-dire de la puissance froide nécessaire en cas de climatisation) pour les scénarios avec climatisation. Les besoins froids sont estimés via le composant *Zone :IdealLoadsAirSystem* qui donne les besoins frigorifiques en kWhf.

Nous avons également cherché à comparer les résultats obtenus avec la consommation électrique réelle du bâtiment actuel. Pour estimer les consommations électriques liées à la climatisation, il est nécessaire de passer par un ratio, qui convertit la production de froid annuelle estimée en STD en consommation électrique ; le SEER.

Le SEER est calculé en faisant la somme de la production froide sur la consommation électrique nécessaire à la production identifiée.

$$SEER = \frac{Production\ frigorifique}{Consommation\ électrique}$$

Le périmètre du SEER peut varier, il peut comprendre seulement la production et la consommation du groupe froid (GEG ou VRV) comme c'est souvent le cas dans les documentations techniques des constructeurs, mais il peut également inclure toutes les consommations annexes nécessaires à la distribution du froid, comme la consommation des pompes et des terminaux par exemple. Ces données peuvent être récupérées en instrumentant de manière complète des bâtiments climatisés (unités de production, pompes, terminaux).

¹ Basés sur des références que l'on trouve actuellement sur le marché et des retours d'expérience de mesures sur site.

Nous proposons des SEER basés sur des retours d'expérience, pour des systèmes récemment installés et étudiés, qui permettront d'estimer les consommations électriques associées **à tous les systèmes nécessaires pour climatiser notre cas d'étude.**

Caractéristiques techniques selon le système

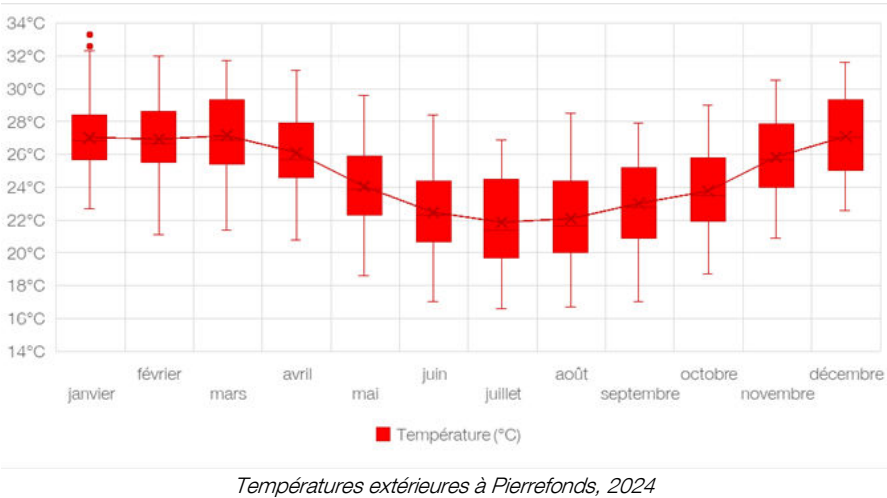
	SEER ¹
Groupe d'eau glacée	3
DRV / VRV	4

La surface utile à climatiser dans ce cas est évaluée à 738 m². Nous baserons la suite de nos calculs en supposant un groupe DRV avec les caractéristiques du tableau précédent.

5.2 Résultats

5.2.1 Données météorologiques sur l'année de mesure

Les données météorologiques proviennent de la station de météo France de l'aéroport de Pierrefonds 2024-2025 (à l'exception des données de rayonnement solaire qui correspondent à une année précédente car les données 2024 étaient incomplètes). On constate que les températures dépassent les 30 °C régulièrement durant les mois de décembre à mars, et sont régulièrement inférieures à 20 °C entre juin et septembre. Gillot est globalement exposé à de fortes températures, ayant un impact sur le confort thermique si les bâtiments sont mal conçus.

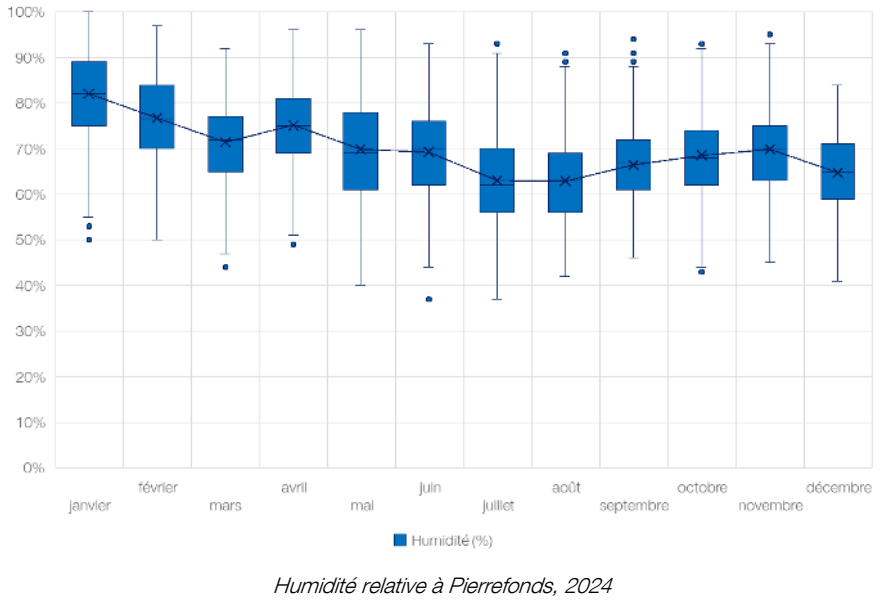


On considère que l’humidité relative ne dégrade pas significativement le confort entre 30 et 70%. Gillot n’est jamais exposé à des taux d’humidité faibles, mais est très régulièrement exposé à de forts taux d’humidité.

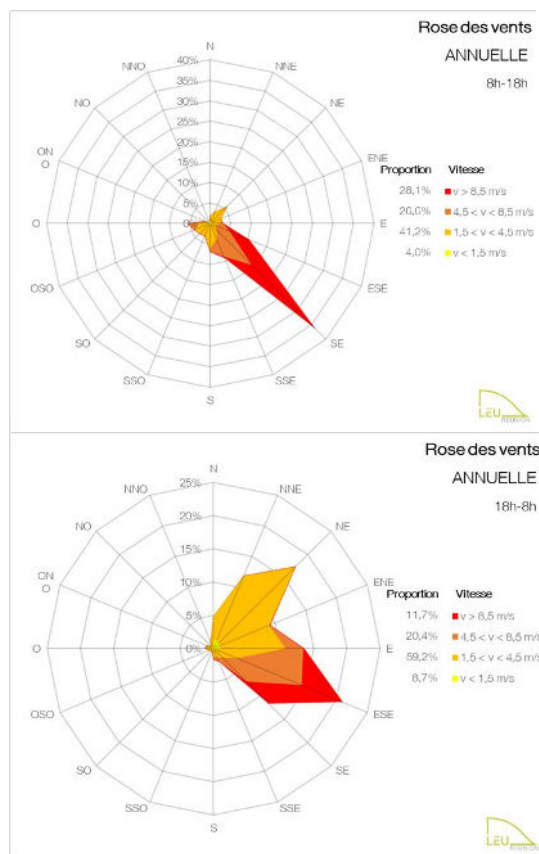
Mois	Nb d’heure où HR>70%	Nb d’heure où HR<30%
Janvier	631	0
Février	426	0
Mars	467	0
Avril	571	0
Mai	367	0
Juin	420	0
Juillet	335	0

² Le potentiel de ventilation naturelle représente la proportion du temps sur l’année où le vent mesuré est supérieur ou égal à 2,5 m/s.

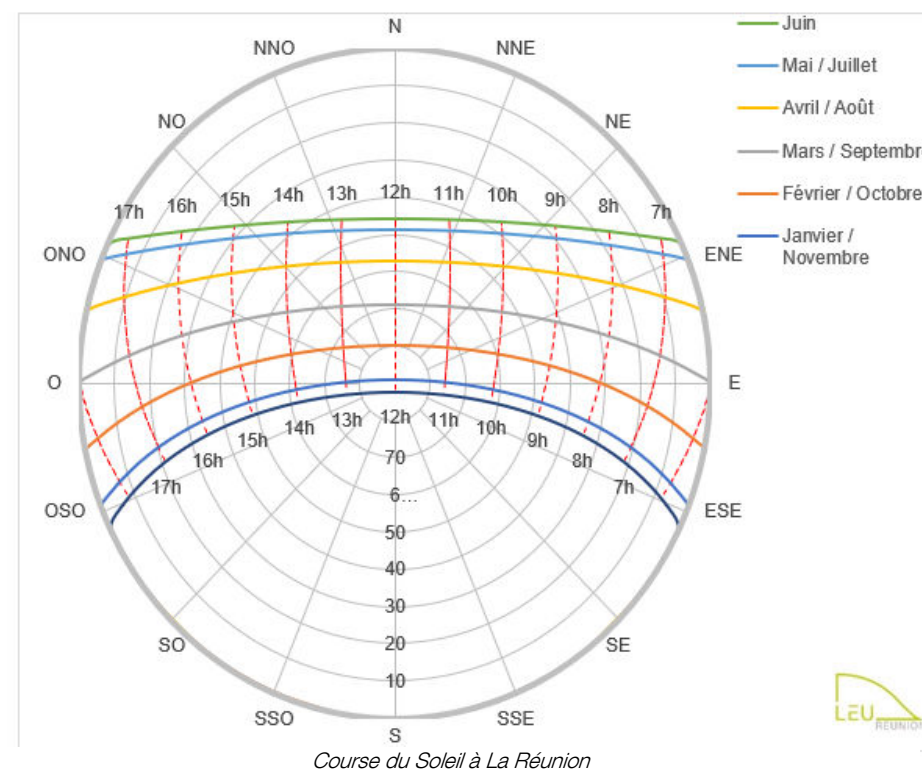
Aout	282	0
Septembre	344	0
Octobre	396	0
Novembre	449	0
Décembre	350	0



Nous retrouvons ci-dessous respectivement la rose des vents de jour et de nuit à Gillot. Les vitesses sont mesurées à 10 m de haut et la station est située au niveau de l’aéroport en bord de mer (catégorie de terrain II – Eurocode 1). La moyenne annuelle de vitesse de vent est de 5 m/s, avec un potentiel de ventilation naturelle² de 75%.



Rose des vents à l'aéroport de Pierrefonds



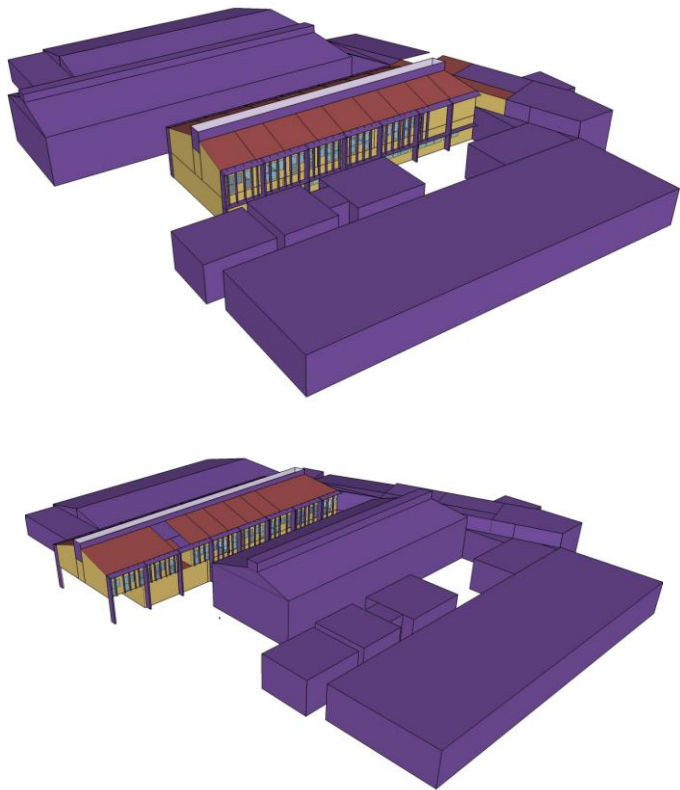
Durant la journée, le vent vient en très grande majorité du Sud-Est +/- 15°, avec des vitesses élevées, très régulièrement supérieures à 4,5 m/s. Ce signal vent est très lié aux alizés. La nuit, le signal vent provient du Nord-Est, ce qui correspond aux brises thermiques nocturnes. Les vents « nocturnes » du secteur SE – ESE sont liés aux alizés.

La course du soleil à La Réunion est caractérisée par un soleil haut dans le ciel, au Sud, pendant la saison chaude, entre novembre et janvier. Le reste du temps, le soleil est au Nord, avec un soleil plus rasant en juin.

Se protéger du soleil en saison chaude est primordial pour réduire les apports de chaleur et les besoins de climatisation. Les façades orientées Sud sont facilement protégeables, puisque le soleil est haut dans le ciel. L'orientation Nord demande des protections légèrement

plus importantes, ainsi que les façades orientées à 45° (NE, SE, SO, NO). Les orientations à éviter, notamment pour les surfaces vitrées, sont les façades Est et Ouest, nécessitant des protections très imposantes, type brises soleil horizontaux.

5.2.2 Modélisation des cas d'étude et recalage



Nous avons comparé les résultats simulés en température/humidités avec les données réellement enregistrées par nos capteurs sur l'année 2024-2025. Les métriques de validation obtenues sont résumées dans les tableaux ci-après :

Métriques de calibration pour le bâtiment Aile Sud

Indicateur	Objectif	E102	E108	E111	E114	E115
NMBEh	Doit tendre vers 0	2,4%	3,6%	4,7%	2,5%	6,8%
CV(RMSE)h	< 30%	3,9%	2,1%	4,3%	2,7%	3,7%
R²	> 65%	81,3%	83,6%	80,7%	72,9%	76,6%
MBE	Doit tendre vers 0	1,08 °C	0,94 °C	1,05 °C	1,32 °C	1,15 °C
MAD	Doit tendre vers 0	5,05 °C	4,46 °C	4,96 °C	5,49 °C	5,16 °C

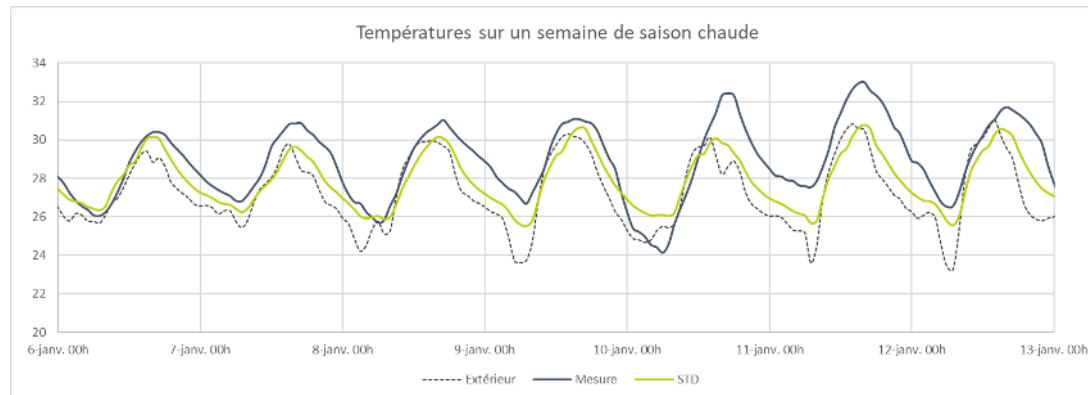
Métriques de calibration pour le bâtiment Aile Nord

Indicateur	Objectif	F101	F108	F105	F118	F113
NMBEh	Doit tendre vers 0	4,3%	3,2%	5,7%	4,1%	2,7%
CV(RMSE)h	< 30%	2,9%	2,7%	4,1%	2,3%	2,7%
R²	> 65%	87,3%	84,0%	80,3%	81,0%	84,3%
MBE	Doit tendre vers 0	0,84 °C	0,99 °C	1,04 °C	0,95 °C	1,01 °C
MAD	Doit tendre vers 0	4,67 °C	5,27 °C	4,82 °C	4,60 °C	4,98 °C

Bien que les valeurs de MAD soient élevées, le modèle de référence est considéré comme validé sur la base des résultats obtenus aux autres métriques.

Projet ASPIRHAUT- OMBREE

Ci-dessous la courbe de températures sur un week-end de saison chaude, pour le bureau E102 par exemple.



Températures sur une semaine de saison chaude pour le bureau E102

La modélisation thermique du bâtiment Aile Sud est jugée satisfaisante en l'état.

5.3 Résultats par scénario

5.3.1 Confort hygrothermique

A titre de comparaison, nous avons sélectionné les diagrammes de Givoni et les seuils de températures pour une salle du bâtiment Aile Sud (E117) et une salle du bâtiment Aile Nord (F118). Ces pièces ont été sélectionnées pour leur forte exposition au soleil. Il s'agit des 2 bureaux les plus à l'ouest de chaque aile, ayant chacun 2 façades donnant sur l'extérieur.

Le confort est analysé sur toute l'année, seulement les jours de semaine, de 8h à 18h.

Confort hygrothermique - Conception actuelle VS optimisée climatisation

	E117 (Aile Sud)			F118 (Aile Nord)		
Conception	Actuelle (1a)	Optimisée climatisation (2a)	(1a – 2a)	Actuelle (1a)	Optimisée climatisation (2a)	(1a – 2a)
Taux de confort à 0 m/s	34,1%	34,7%	-0.6%	36,7%	37,9%	-1.2%
Taux de confort à 0,5 m/s	62,6%	60,8%	+1.8%	63,3%	66,2%	-2.9%
Taux de confort à 1 m/s	85,3%	82,3%	+3.0%	84,5%	89,0%	-4.5%
Taux de confort à 1,5 m/s	96,4%	93,8%	+2.6%	95,5%	98,0%	-2.5%
Nombre d'heures > 28 °C	945 h	1 024 h	-79h	831 h	780 h	+51h
Nombre d'heures > 30 °C	280 h	345 h	-65h	140 h	88 h	+52h
Nombre d'heures > 32 °C	3 h	1 h	+2h	0 h	0 h	-

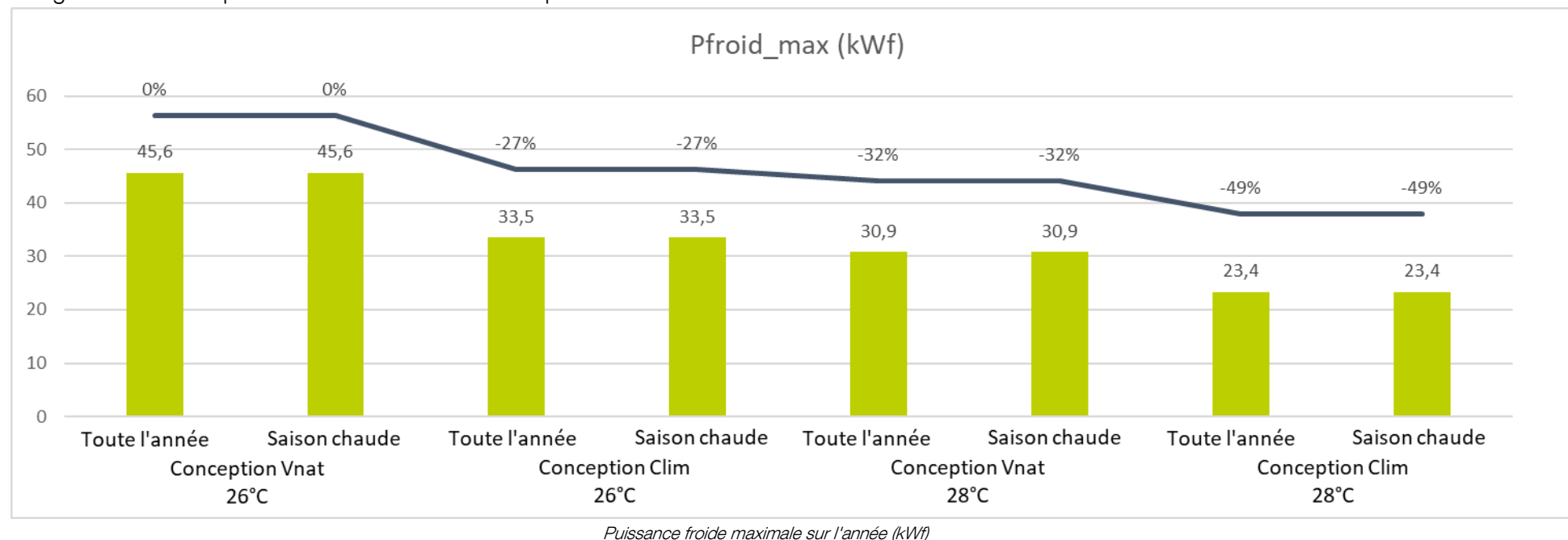
Les taux de confort ainsi que les taux de températures supérieures aux seuils proposés varient peu entre les 2 conceptions (moins de 5% d'écart). Ceci peut s'expliquer par :

- La faible différence de résistance thermique des parois entre les 2 conceptions,
- La forte porosité qui n'a pas été modifiée entre les 2 conceptions et qui réduit l'influence de la perméabilité à l'air (traduite par les taux d'infiltrations),

Les protections solaires très efficaces déjà mises en place dans la « conception actuelle », ce qui réduit l'influence du vitrage (simple ou double). Il est à noter tout de même qu'il y a plutôt une tendance à l'augmentation du confort en passant en conception climatisée dans l'Aile Sud tandis que la conception actuelle apporte plus de confort dans l'Aile Nord.

5.3.2 Besoin froid : Puissance froide max appelée (en cas de climatisation)

La figure ci-dessous présente l'influence de la conception sur les besoins froids.



La première chose que l'on constate est que le passage d'un scénario « climatisation toute l'année » à « climatisation en saison chaude uniquement » n'a pas d'influence sur la puissance froide maximale. Ceci est logique, étant donné que la demande de froid est plus forte en saison chaude.

Ensuite, on constate que :

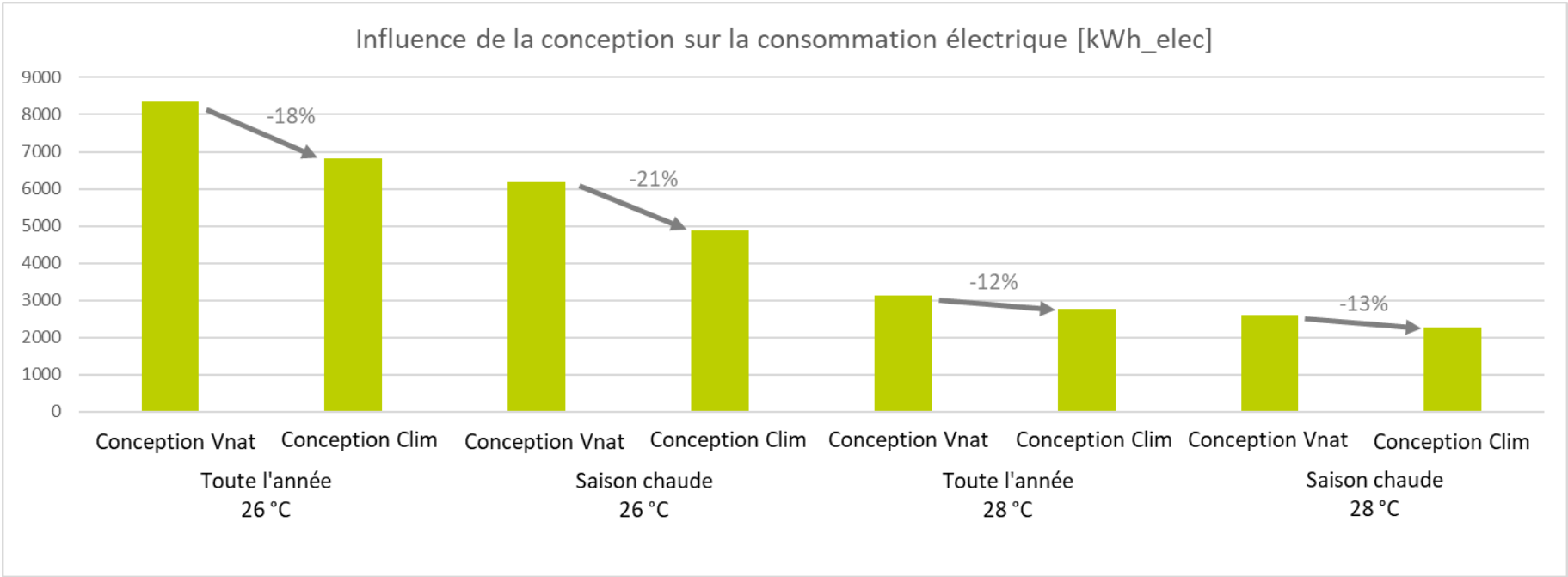
- Passer d'une conception Vnat à une conception optimisée pour la climatisation permet de réduire de 27%, dans ce cas, la Pfroid_max,
- Passer d'une consigne de 26°C à 28°C permet de réduire de 30 à 34% Pfroid_max,
- Augmenter la consigne à 28°C (-32%) a plus d'impact qu'optimiser la conception (-27%),
- La combinaison « conception optimisée pour la climatisation » + « consigne remontée à 28°C » permet, dans ce cas, de gagner presque 50% sur Pfroid_max.

Le tableau synthétique ci-dessous reprend les éléments expliqués en intégrant également un ratio surfacique sur la base d'une surface climatisée de 738 m².

Puissance froide maximale par scénario				
	Conception Vnat, 26°C (Cas_réf)	Conception Clim, 26°C	Conception Vnat, 28°C	Conception Clim, 28°C
Pfroid_max (kWf)	45,6	33,5	30,9	23,4
Différence VS Cas_réf	-	-27%	-32%	-49%
Pfroid surfacique (Wf/m²clim)	61,8	45,4	41,8	31,6

5.3.3 Consommations électriques de climatisation

La figure ci-dessous présente l'influence de la conception sur la consommation électrique. On constate qu'en réduisant les infiltrations (construction plus étanche) et en augmentant légèrement la résistance thermique globale de l'enveloppe, il est possible de réduire de 12 à 21% la consommation électrique de climatisation.

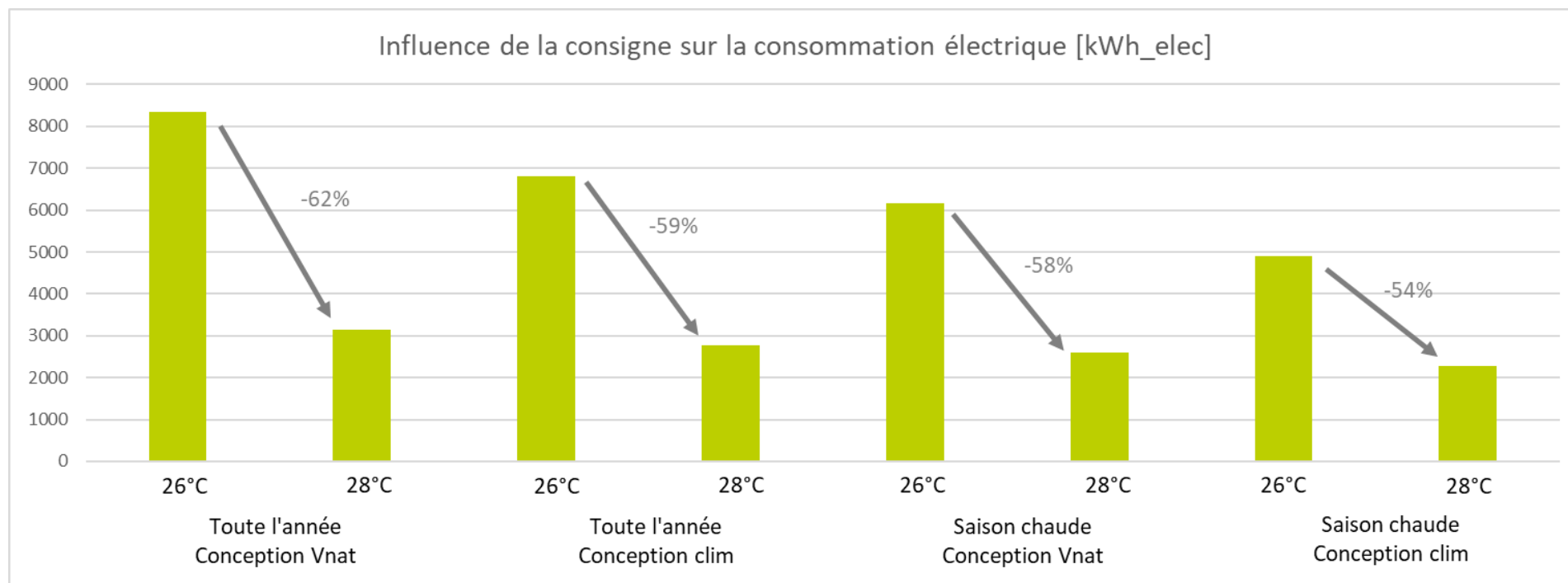


Influence de la conception sur les besoins énergétiques

La figure ci-dessous présente l'influence de la température de consigne sur la consommation électrique. L'augmentation de 2 °C de la consigne de température permet théoriquement de réduire la consommation électrique de 54 à 62%.

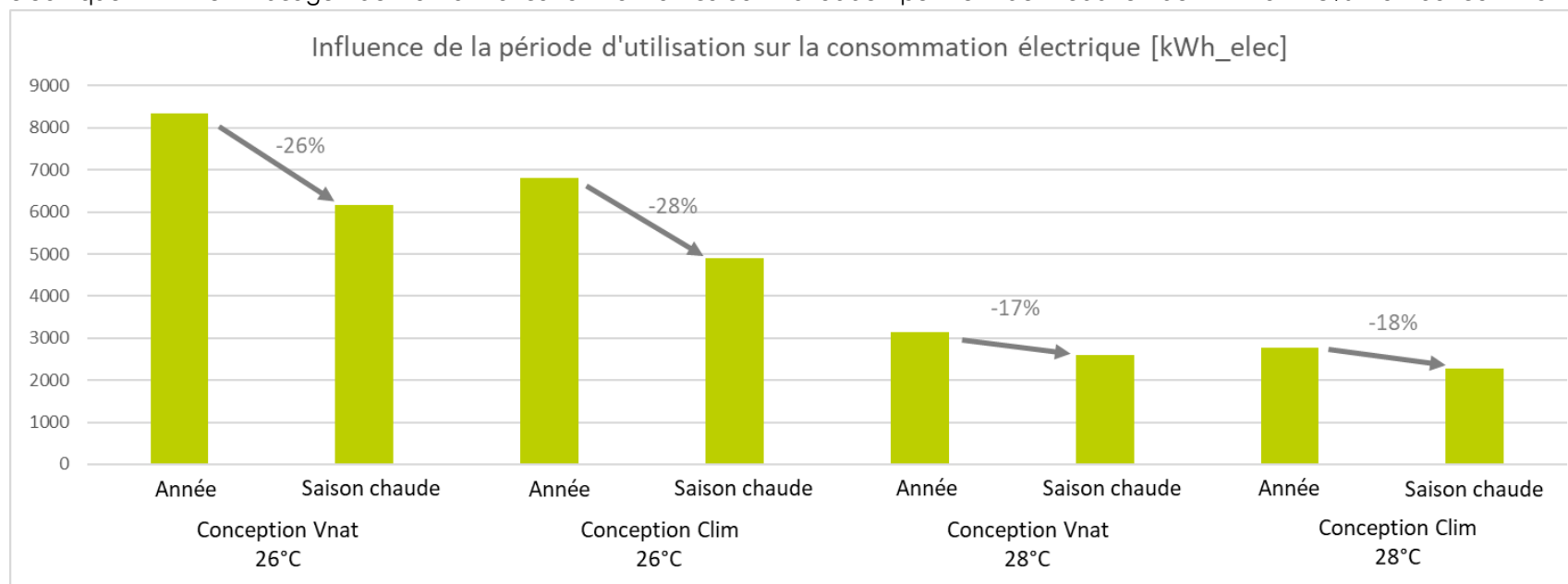
Cette grande différence s'explique par deux facteurs :

- En passant la consigne de 26°C à 28°C, on réduit le nombre d'heures climatisées (-11 à 15% en saison chaude, -39 à 45% sur toute l'année). C'est autant d'heures **où les consommations de climatisation sont totalement supprimées**,
- De plus, cette augmentation de consigne réduit la puissance nécessaire pour refroidir les espaces (-30 à 34% sur la puissance frigorifique maximale appelée).



Influence de la consigne sur les besoins énergétiques

Le dernier paramètre étudié (voir figure ci-dessous) est l'influence de la période d'utilisation de la climatisation sur l'année sur la consommation électrique. Limiter l'usage de la climatisation à la saison chaude permet de réduire de 17 à 28% la consommation électrique.

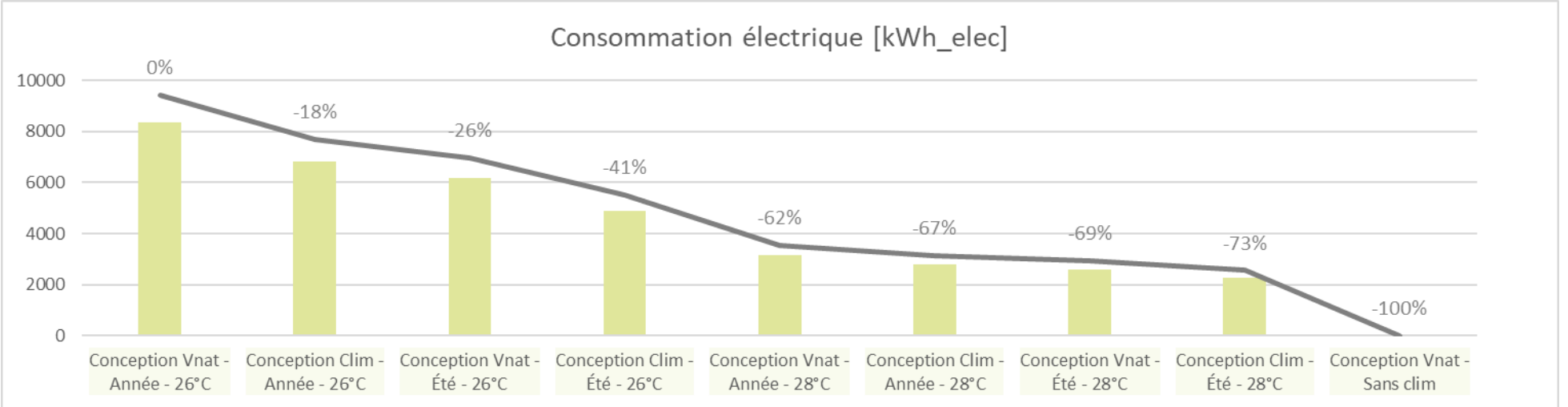


Influence de la période d'utilisation de la climatisation sur les besoins énergétiques

Pour récapituler, les tendances sont les suivantes :

- Toute chose égale par ailleurs, ce bâtiment conçu pour la ventilation naturelle a une consommation électrique liée à la climatisation plus importante que ce même bâtiment qui aurait été conçu de manière « classique », si les deux avaient été climatisés ; 12 à 21% de consommation électrique en moins pour une conception adaptée,
- Passer d'une consigne de 26 °C à 28 °C permet de réduire de 54 à 62% la consommation électrique,
- Réduire l'usage de la climatisation aux 5 mois les plus chauds de l'année (novembre – mars) permet de réduire de 17 à 28% la consommation électrique.

Ci-dessous les résultats triés du scénario le plus consommateur au moins consommateur.



Besoins énergétiques par scénario

Consommations électriques de climatisation par scénario

	Conception Vnat Toute l'année 26°C (Cas_réf)	Conception Clim Toute l'année 26°C	Conception Vnat Saison chaude 26°C	Conception Clim Saison chaude 26°C	Conception Vnat Toute l'année 28°C	Conception Clim Toute l'année 28°C	Conception Vnat Saison chaude 28°C	Conception Clim Saison chaude 28°C
Consommation électrique de climatisation (kWhe)	8 344	6 818	6 175	4 889	3 144	2 781	2 610	2 273
Différence VS Cas_réf	-	-18%	-26%	-41%	-62%	-67%	-69%	-73%
Consommation électrique de clim. surfacique (kWhe/m²clim)	11.3	9.2	8.4	6.6	4.3	3.8	3.5	3.1

On constate que la consommation électrique de climatisation est réduite de 73% entre « conception Vnat + climatisation toute l’année à 26°C » et « conception Clim + climatisation en saison chaude à 28°C », soit :

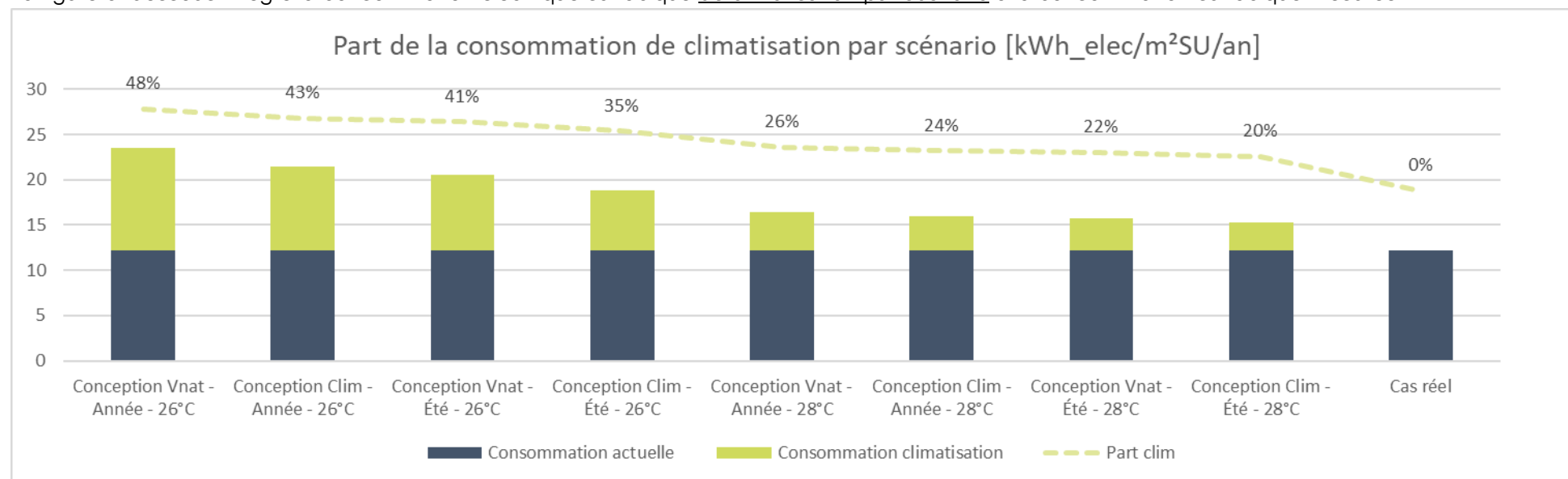
- De 8.3 MWh/an à 2.3 MWh/an,
- De 11.3 kWh/m²SU/an à 3,1 kWh/m²SU/an.

5.3.4 Economies réalisées

Le CIRAD a fourni des rapports de suivi énergétique réalisés entre 2022 et 2023 à la suite de la mise en exploitation de l'extension du site de Ligne Paradis, dont font parties les ailes Sud et Nord.

Entre août 2022 et juillet 2023, le rapport indique un ratio mesuré de 12,2 kWh_{élec}/m²/an pour la partie « bureaux ».

La figure ci-dessous intègre la consommation électrique surfacique de climatisation par scénario à la consommation surfacique mesurée.



Projection de la consommation des bureaux du CIRAD par scénario

Si le projet avait été équipé d'un système de climatisation (groupe VRV, SEER = 4), la consommation de climatisation aurait pu représenter entre 20 et 48% de la consommation des bureaux.

6 PRECONISATIONS

Le diagnostic thermique a montré que la conception aérothermique du bâtiment est globalement performante, avec une enveloppe bien protégée du rayonnement solaire et une ventilation satisfaisante dans la plupart des situations.

Néanmoins, des améliorations ciblées permettraient de renforcer le confort en période estivale, notamment pour limiter le nombre d'heures au-dessus de 28 °C et 30 °C observées à l'intérieur.

1. **Surélévation du puits dépressionnaire avec ailettes** : Rehausser le puits et y intégrer des ailettes afin d'augmenter l'efficacité de l'extraction d'air et de réduire les pertes de charge actuelles (notamment liées à la présence de casquettes aux jalousies dans le canyon et de l'onduleur de la centrale solaire).



Localisation des « déflecteurs » à installer dans les puits dépressionnaires

2. **Optimisation de la gestion des ouvrants** : Mettre en place une stratégie de gestion adaptée des ouvertures en période estivale, afin de maximiser la ventilation naturelle et d'assurer une bonne décharge thermique nocturne. Il est clair qu'ouvrir un peu plus la nuit permettrait d'enlever les calories de tout le bâtiment et capitaliser le froid dans la structure du bâtiment.

3. **Ajout de protections solaires pour les bureaux orientés Nord** : Installer des dispositifs supplémentaires au nord afin de limiter les apports solaires directs dans les bureaux exposés et réduire les surchauffes locales. Ceci peut se traduire architecturalement par le prolongement du débord de toiture et/ou la pose de dispositifs de protections solaires spécifiques pour les baies. En effet, les lames opaques ne sont pas très performantes et vont rayonner à l'intérieur du volume bâti.



4. **Suppression de la fermeture automatique des jalousies par vent > 4,5 m/s** : Maintenir le fonctionnement des jalousies même en cas de vents soutenus, afin de garantir la continuité de la ventilation et éviter les phases d'accumulation de chaleur dans les locaux. Ceci est un point fondamental car les vents à Saint-Pierre sont souvent supérieurs à cette vitesse d'air. Néanmoins, une régulation peut être envisagée lorsque la pluie est présente.
5. **Sensibilisation des usagers au bon fonctionnement thermique du bâtiment** : Mettre en place des actions de communication pour rappeler aux usagers du bâtiment les principes de gestion des ouvrants et du système aéraulique.

7 ANNEXE : Nombre d'heures au-dessus des seuils de températures issues des simulations thermiques

E117 – Scénario 1a

Seuils de température de confort							
-	Occupation	T < 20°C	20°C < T < 28°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > Text
Janvier	200 h	0 h	64 h	136 h	38 h	3 h	156 h
Février	200 h	0 h	65 h	135 h	48 h	0 h	142 h
Mars	230 h	0 h	43 h	187 h	90 h	0 h	171 h
Avril	210 h	0 h	77 h	133 h	24 h	0 h	188 h
Mai	190 h	0 h	164 h	26 h	0 h	0 h	145 h
Juin	220 h	0 h	219 h	1 h	0 h	0 h	173 h
Juillet	210 h	0 h	210 h	0 h	0 h	0 h	129 h
Août	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	171 h
Septembre	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	150 h
Octobre	210 h	0 h	196 h	14 h	0 h	0 h	139 h
Novembre	200 h	0 h	75 h	125 h	7 h	0 h	121 h
Décembre	220 h	0 h	32 h	188 h	73 h	0 h	131 h
Été	1260 h	0 h	356 h	904 h	280 h	3 h	909 h
Hiver	1270 h						907 h
Annuel	2530 h	0 h	1585 h	945 h	280 h	3 h	1816 h
Ratio	100,0%	0,0%	62,6%	37,4%	11,1%	0,1%	71,8%

E117 – Scénario 2a

Seuils de température de confort							
-	Occupation	T < 20°C	20°C < T < 28°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > Text
Janvier	200 h	0 h	44 h	156 h	60 h	0 h	161 h
Février	200 h	0 h	37 h	163 h	52 h	1 h	142 h
Mars	230 h	0 h	38 h	192 h	95 h	0 h	165 h
Avril	210 h	0 h	73 h	137 h	39 h	0 h	182 h
Mai	190 h	0 h	145 h	45 h	0 h	0 h	142 h
Juin	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	158 h
Juillet	210 h	0 h	210 h	0 h	0 h	0 h	113 h
Août	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	155 h
Septembre	220 h	0 h	218 h	2 h	0 h	0 h	132 h
Octobre	210 h	0 h	195 h	15 h	0 h	0 h	131 h
Novembre	200 h	0 h	71 h	129 h	14 h	0 h	121 h
Décembre	220 h	0 h	35 h	185 h	85 h	0 h	129 h
Été	1260 h	0 h	298 h	962 h	345 h	1 h	900 h
Hiver	1270 h						831 h
Annuel	2530 h	0 h	1506 h	1024 h	345 h	1 h	1731 h
Ratio	100,0%	0,0%	59,5%	40,5%	13,6%	0,0%	68,4%

F118 – Scénario 1a

Seuils de température de confort							
-	Occupation	T < 20°C	20°C < T < 28°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > Text
Janvier	200 h	0 h	67 h	133 h	31 h	0 h	126 h
Février	200 h	0 h	61 h	139 h	24 h	0 h	107 h
Mars	230 h	0 h	67 h	163 h	39 h	0 h	72 h
Avril	210 h	0 h	93 h	117 h	6 h	0 h	135 h
Mai	190 h	0 h	158 h	32 h	0 h	0 h	136 h
Juin	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	176 h
Juillet	210 h	0 h	210 h	0 h	0 h	0 h	129 h
Août	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	113 h
Septembre	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	54 h
Octobre	210 h	0 h	210 h	0 h	0 h	0 h	72 h
Novembre	200 h	0 h	127 h	73 h	0 h	0 h	53 h
Décembre	220 h	0 h	46 h	174 h	40 h	0 h	54 h
Été	1260 h	0 h	461 h	799 h	140 h	0 h	547 h
Hiver	1270 h						680 h
Annuel	2530 h	0 h	1699 h	831 h	140 h	0 h	1227 h
Ratio	100,0%	0,0%	67,2%	32,8%	5,5%	0,0%	48,5%

F118 – Scénario 2a

Seuils de température de confort							
-	Occupation	T < 20°C	20°C < T < 28°C	T > 28°C	T > 30°C	T > 32°C	T > Text
Janvier	200 h	0 h	76 h	124 h	14 h	0 h	115 h
Février	200 h	0 h	68 h	132 h	16 h	0 h	105 h
Mars	230 h	0 h	61 h	169 h	32 h	0 h	70 h
Avril	210 h	0 h	94 h	116 h	2 h	0 h	128 h
Mai	190 h	0 h	173 h	17 h	0 h	0 h	134 h
Juin	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	175 h
Juillet	210 h	0 h	210 h	0 h	0 h	0 h	120 h
Août	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	96 h
Septembre	220 h	0 h	220 h	0 h	0 h	0 h	48 h
Octobre	210 h	0 h	210 h	0 h	0 h	0 h	68 h
Novembre	200 h	0 h	144 h	56 h	0 h	0 h	41 h
Décembre	220 h	0 h	54 h	166 h	24 h	0 h	36 h
Été	1260 h	0 h	497 h	763 h	88 h	0 h	495 h
Hiver	1270 h						641 h
Annuel	2530 h	0 h	1750 h	780 h	88 h	0 h	1136 h
Ratio	100,0%	0,0%	69,2%	30,8%	3,5%	0,0%	44,9%