

ASPIRHAUT

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

Rapport d'expérimentation Amphithéâtre bioclimatique du Moufia (Réunion)

Octobre 2025

Equipe technique	Financeurs
 <p>Porteur de projet</p>   	    

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	6
2.4	Retours d'expérience.....	7
3	ETUDE AERAULIQUE	8
3.1	Métrie de mesures aérauliques	8
3.2	Matériel de mesure	8
3.3	Résultats	11
4	ETUDE CONFORT	14
4.1	Méthodologie.....	14
4.2	Résultats	15
4.3	Conclusion.....	18
5	ETUDE ENERGETIQUE	19
5.1	Méthodologie.....	19
5.2	Résultats	22
5.3	Résultats par scénario	28
5.4	Comparaison avec les autres cas d'étude	Erreur ! Signet non défini.
6	PRECONISATIONS.....	36

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 : Sainte-Marie

Date de livraison : 2014

Typologie : Amphithéâtre

Superficie totale du projet : 1 185 m²

Coût travaux : 9 640 000 euros

Consommation énergétique : 23 Kwhef/m²SU/an

Maîtrise d'ouvrage : Université de La Réunion

Maîtrise d'œuvre : Mandataire OBA, Scénographe Roland Roussel, IMAGEEN, Jacques Gandemer

Type de système dépressionnaire mis en œuvre : Canyon dépressionnaire



2.2 Contexte environnemental et énergie

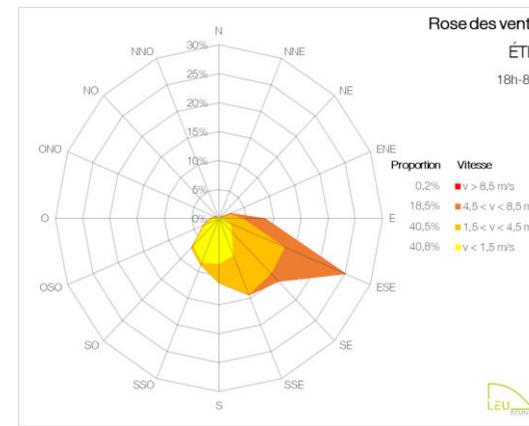
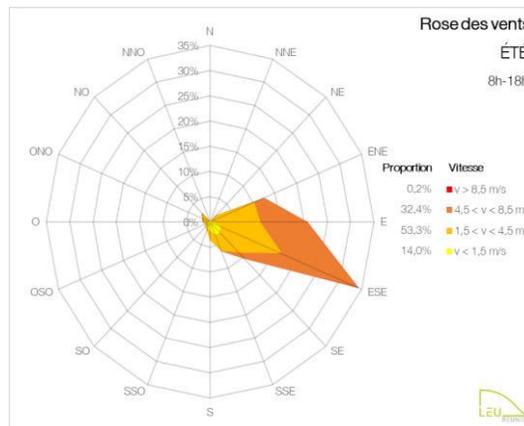
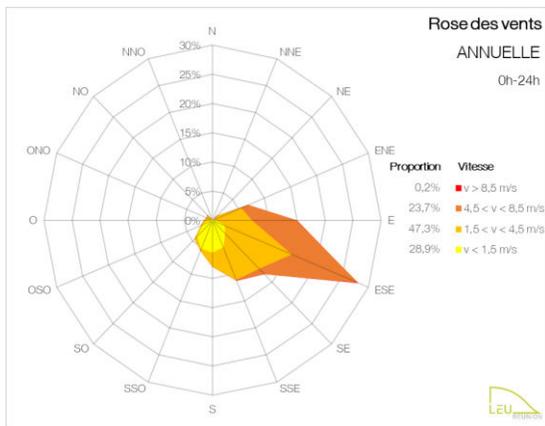
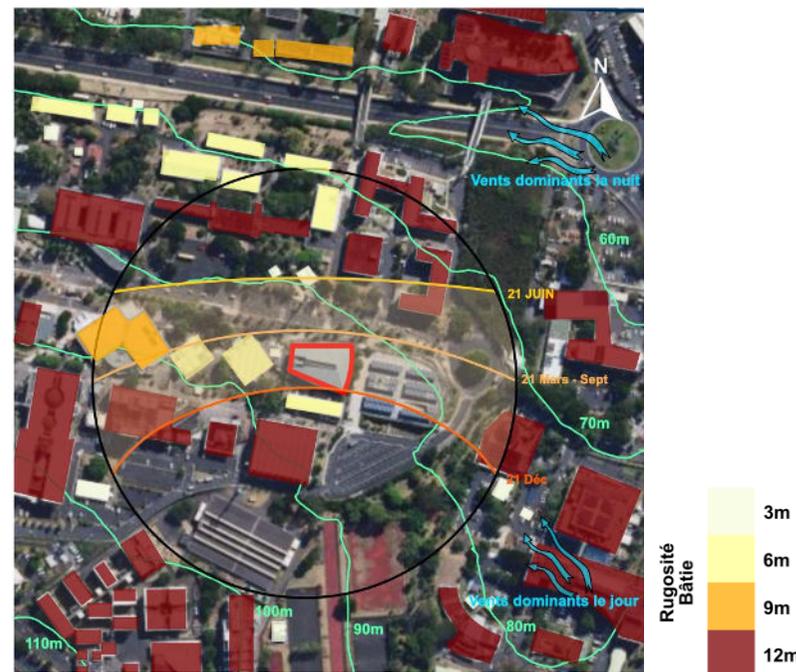
Le bâtiment se situe dans un environnement urbain. Il est proche d'un bâtiment R+2 au Sud mais surplombe la voie de desserte de l'Université au Nord. Globalement, il n'y a pas d'obstacles majeurs bloquant la circulation d'air sur les orientations Est et Nord-Est.

Altitude : 82 m

Type d'environnement : Urbain

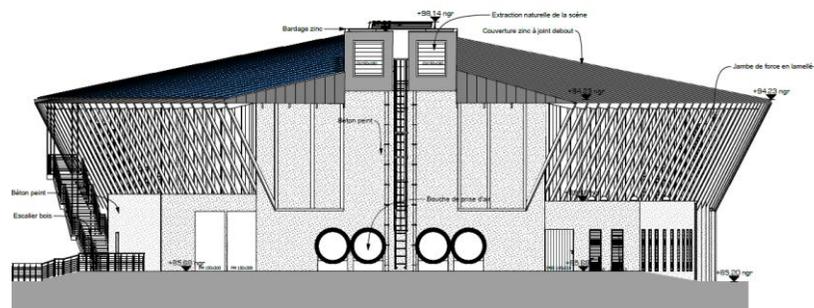
Effet de masques : Absence de masque immédiat entre le Sud-Est et le Nord-Est

Les vents dominants proviennent principalement de l'Est-Sud-Est en journée, avec des influencent de brises thermiques orientées Sud-Sud-Est la nuit.



2.3 Système architectural

Le canyon dépressionnaire de l’amphithéâtre du Moufia alimente un volume de 4580 m³. Il s’agit du plus grand amphithéâtre entièrement en ventilation naturelle en climat tropical. Les jalousies du canyon sont motorisées tandis que toutes les jalousies en façades sont manuelles et gérées par un technicien du site, formé à la bonne utilisation des ouvertures. L’air entre par les façades Nord, Sud ainsi que par le dessous des gradins qui sont perforées à l’Est. Il est extrait par le canyon et 2 ouvertures existent en fond de scène. Seule la régie est climatisée.



Gestion des ouvrants	type	Motorisée au niveau du canyon et manuelle en façades
Emergence	m	45 cm au point le plus bas, 90 cm au point le plus haut (Pour 3m de profondeur)
Dimensions	m * m	23 * 2.9
Surface système	m ²	67
Surfaces ouvertures façade admission	m ²	97 compris pipes sous les gradins
Surface ouvertures façade extraction	m ²	46
Surface totale des façades	m ²	817 (compris façade Est comprenant les pipes)
Volume des espaces à ventiler	m ³	4580 (Pour 508 m ²)
Ratio surface ouverture admission/ S ventilée	%	19 %
Ratio surface ouverture extraction/ S ventilée	%	9 %



Crédit photo : Hervé Douris

2.4 Retours d'expérience

2.4.1 Point de vue du concepteur

Personne interrogée : Olivier Brabant

Retour d'expérience : Thermiquement je trouve que le puits dépressionnaire permet aux usagers d'être en situation de confort toute l'année sans usage de système de climatisation. Ce bâtiment fût le premier équipé d'un système de puits dépressionnaire. L'université nous a suivi dans cette démarche novatrice et maintenant on voit de plus en plus de bâtiments avec ces systèmes de ventilation. On peut en conclure que cela a été une réussite. D'après les questionnaires réalisés auprès des usagers, le confort thermique est atteint et ceci sans système de climatisation énergivore dans un amphithéâtre ayant une contenance de 500 personnes, donc avec des charges internes qui peuvent être très importantes. Il avait été imaginé de placer des systèmes d'extraction aéraulique, en sus, car nous n'avions aucun retour d'expérience sur cette manière d'optimiser la ventilation naturelle et on pouvait avoir un doute. Néanmoins après usage, il n'a pas été nécessaire de placer ce dispositif, le bâtiment étant déjà performant et atteignant les taux de renouvellement d'air souhaité pour l'évacuation des surcharges thermiques. Si je devais l'améliorer en matière de confort, il aurait intéressant de plus insister sur le confort thermique de la scène.

2.4.2 Point de vue du gestionnaire de site

Personne interrogée : Jean Paul Albac et Eric Monceyron, Technicien/gestionnaire de site et Responsable de la Maîtrise de l'Energie de l'Université

Retour d'expérience :

Tous deux en poste depuis la mise en service du bâtiment, ils ont participé à la campagne de sensibilisation sur le fonctionnement de l'amphithéâtre, à la livraison, qui impliquait les usagers et la maîtrise d'ouvrage. Ils précisent que l'ouverture et la fermeture des menuiseries se font manuellement, avec une possibilité d'intervention par les usagers. Globalement satisfaits de la conception du bâtiment, ils relèvent toutefois un léger inconfort thermique, surtout en période chaude et humide, mais il insiste que ce n'est pas la chaleur en elle-même qui pose un problème, plutôt la présence de moustiques. Des tests avec des moustiquaires ont été réalisés dans d'autres bâtiments, mais ils ont réduit la luminosité. Ils signalent aussi que l'ouverture des jalousies par temps venteux génère de la poussière, ce qui pourrait être réduit par une meilleure végétalisation des abords. Par ailleurs, les conférences organisées dans l'amphithéâtre engendrent des nuisances sonores pour les bâtiments voisins. Pour améliorer le confort, ils suggèrent la motorisation des jalousies en façades et une meilleure ventilation de la scène, qui a tendance à être plus chaude. Malgré ces ajustements possibles, ils sont satisfaits de l'approche énergétique du bâtiment. S'il devait être reconstruit, ils privilégieraient à nouveau une ventilation naturelle plutôt que la climatisation, estimant que le faible inconfort ressenti à l'échelle de l'année ne justifie pas un système climatisé.

3 ETUDE AERAIQUE

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

3.1 Métrique de mesures aéraiues

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.



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 d'un fil chauffé par effet Joule (faible courant électrique), et le passage d'un flux d'air va le refroidir par convection.

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).



FKIMO HQ 210

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'amphithéâtre bioclimatique du Moufia à La Réunion fonctionne en ventilation naturelle grâce à un **canyon dépressionnaire**. Nous sommes intervenus sur une semaine d'inoccupation du site en aout 2024, ce qui a facilité la manipulation des ouvertures.

Nous avons tout d'abord installé la station de référence à l'intérieur du canyon, en le faisant émerger au maximum par rapport à la hauteur du toit.

Nous avons ensuite divisé en deux zones le 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 : Toutes les jalousies ouvertes à l'admission y compris les jalousies en fond de scène,
- 2 : Jalousies ouvertes au nord et fermées au sud, fermées en fond de scènes,
- 3 : Jalousies ouvertes au sud et fermées au nord, fermées en fond de scènes,
- 4 : Toutes les jalousies fermées à l'exception des jalousies en fond de scène.



Amphithéâtre de Moufia et Station météorologique extérieure + anémomètres dans le canyon dépressionnaire (Réunion)

Projet ASPIRHAUT- OMBREE

Pour chaque scénario, 2 campagnes de mesures de 30min ont été réalisées : une campagne pour la zone 1 notée **Z1** (4 premiers points de mesure) et une campagne pour les 4 autres points de mesures en zone 2 (notée **Z2**).

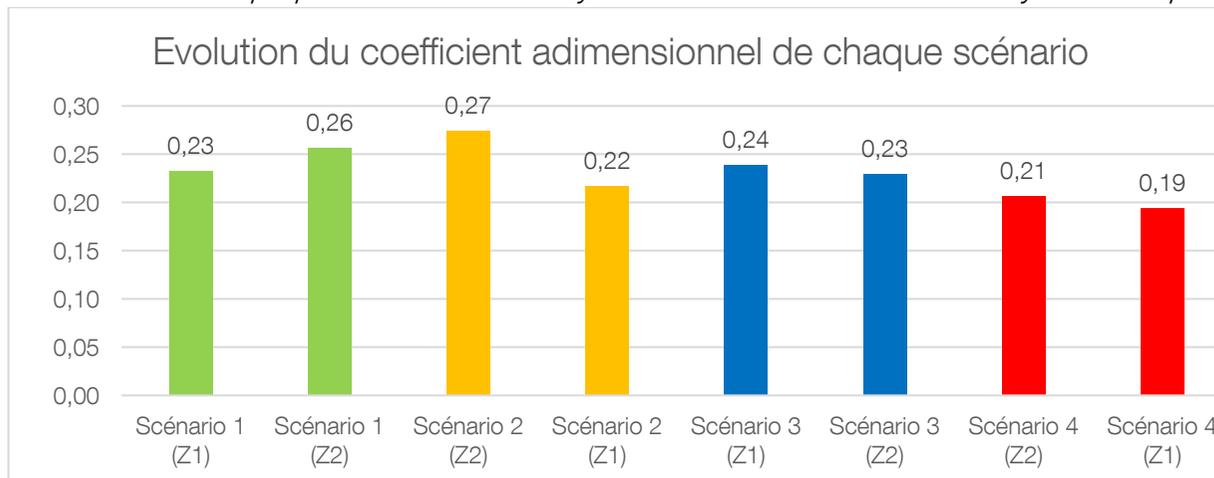


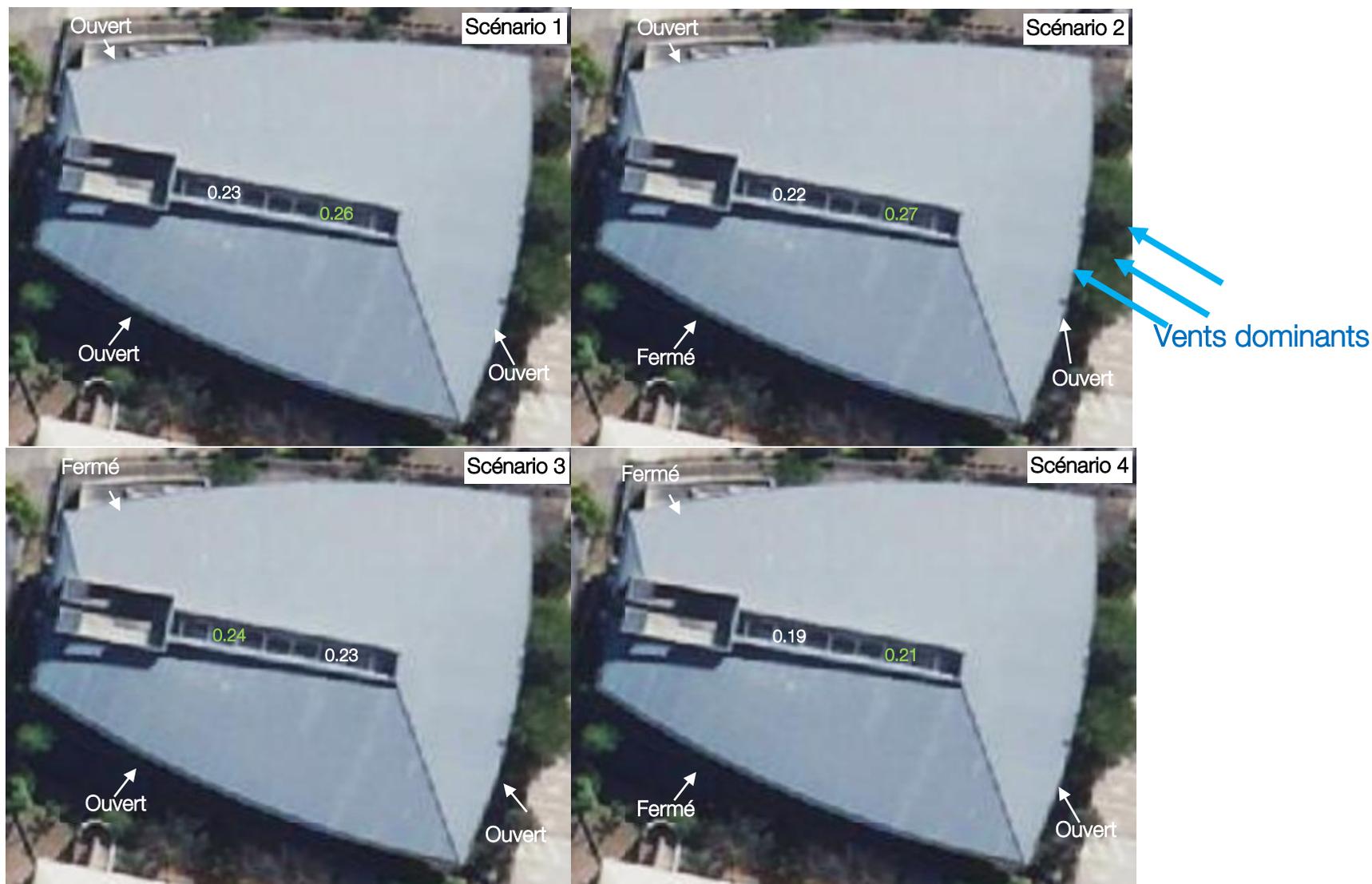
Localisation des zones 1 et 2, 4 points de mesure par zone

3.3 Résultats

Configuration	P-1:Va [m/s]	P-2:Va [m/s]	P-4:Va [m/s]	P-5:Va [m/s]	Va moy [m/s]	P-1:Ta [°C]	P-2:Ta [°C]	P-4:Ta [°C]	P-5:Ta [°C]	Ta moy [°C]	V référence moy [m/s]	Direction vent [°]	C-1	C-2	C-4	C-5	C moy
Scénario 1 (Z1)	1,92	1,93	1,88	1,89	1,90	27,83	27,84	27,57	27,82	27,77	8,4	123	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23
Scénario 1 (Z2)	2,16	2,11	2,22	2,26	2,19	27,32	27,33	26,79	27,26	27,18	8,9	129	0,25	0,25	0,26	0,27	0,26
Scénario 2 (Z2)	2,54	2,53	2,67	2,90	2,66	26,91	26,96	26,46	26,85	26,79	9,8	124	0,26	0,26	0,28	0,30	0,27
Scénario 2 (Z1)	1,91	1,97	1,87	1,80	1,89	25,38	26,01	26,05	26,51	25,99	8,8	141	0,22	0,23	0,21	0,21	0,22
Scénario 3 (Z1)	1,66	1,70	1,66	1,58	1,65	24,35	24,85	24,83	24,87	24,72	7,1	145	0,24	0,25	0,24	0,23	0,24
Scénario 3 (Z2)	1,50	1,54	1,73	1,38	1,53	24,63	24,80	24,75	24,86	24,76	6,9	138	0,22	0,23	0,26	0,21	0,23
Scénario 4 (Z2)	1,56	1,66	1,76	1,51	1,62	25,13	25,25	25,14	25,33	25,21	7,9	135	0,20	0,21	0,22	0,19	0,21
Scénario 4 (Z1)	1,45	1,46	1,25	1,17	1,33	23,21	23,69	23,92	24,11	23,73	6,9	138	0,21	0,21	0,18	0,17	0,19

P-1 à P-5 sont les numéros de capteurs positionnés dans le cayon dépressionnaire. Va = vitesse d'air. Ta = Température d'air. C-1 à C-5 sont les coefficients adimensionnels calculés à chaque point de mesure. Cmoyen = coefficient adimensionnel moyen calculé pour l'ensemble du système.





Résultats de coefficients adimensionnels moyens pour chaque scénario

Projet ASPIRHAUT- OMBREE

Les coefficients adimensionnels varient entre 0,19 et 0,28 dans le canyon, selon les configurations.

Le scénario le plus performant est le scénario 1 (ouvertures totales), atteignant un coefficient moyen de 0,28, tandis que le scénario le moins efficace est le scénario 4 (ouvertures minimales), avec un coefficient de 0,19. Cela signifie qu'augmenter la surface d'admission en ouvrant les jalousies en façade améliore la performance globale du système.

Malgré cela, même en configuration quasi fermée (scénario 4), un flux reste mesurable ($C \approx 0,2$), ce qui démontre que le système conserve un fonctionnement minimal grâce à la circulation d'air sous les gradins, positionnés perpendiculairement aux vents dominants.

On constate également que l'ouverture sur une seule façade (nord ou sud) ne dégrade pas significativement les performances par rapport à l'ouverture complète. Les scénarios 2 et 3, qui ne laissent passer l'air que par une seule façade, donnent des coefficients similaires à ceux du

scénario 1. Cela indique qu'une seule ouverture suffit à créer une dynamique d'air efficace dans le canyon. Cependant, l'ouverture au Nord ou au sud aura un impact sur le cheminement intérieur de l'air et sur les zones de l'amphithéâtre qui seront ventilées.

Dans presque tous les scénarios, les valeurs mesurées dans la zone Z2 sont supérieures à celles de Z1. La dépression en Z2 est plus importante qu'en Z1 étant donné sa proximité à l'émergence en surpression.

Dans la configuration actuelle, le canyon est parallèle aux vents dominants. Cette orientation limite l'effet de surpression sur la longueur émergente du canyon, et donc de dépression générée dans le système. Une orientation perpendiculaire aurait probablement permis d'atteindre des coefficients adimensionnels plus élevés. Les valeurs observées, bien que relatives, montrent une efficacité de base du système, même en conditions non optimales.

4 ETUDE CONFORT

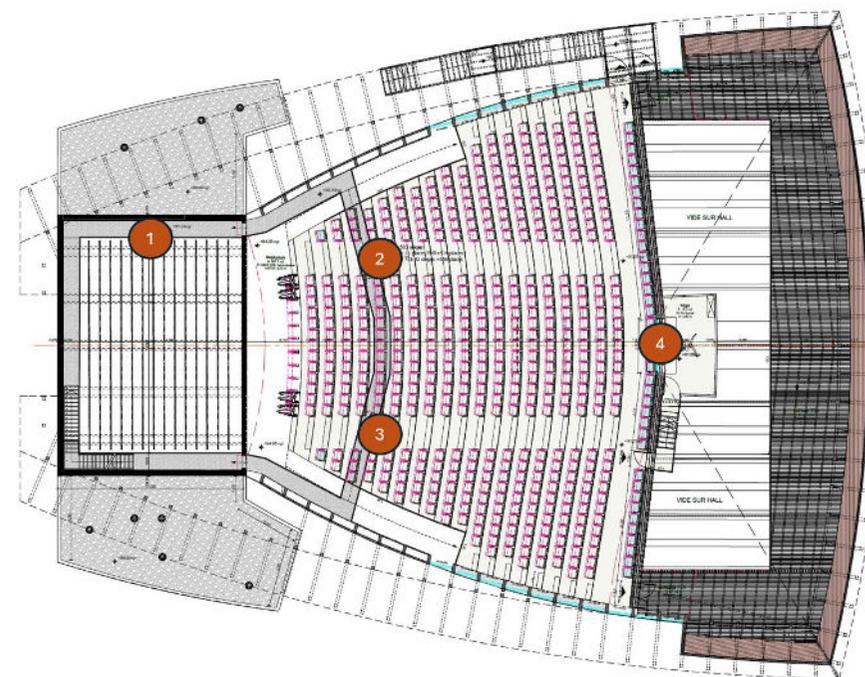
4.1 Méthodologie

En parallèle de ces mesures aérauliques, 4 **capteurs de température et humidité relative** ont été installés au niveau de la scène, au fond de l'amphithéâtre ainsi que sur les ailes nord et sud des gradins. Ces données ont été suivies sur une année et permettent **d'obtenir une cartographie de l'évolution hygrothermique à l'intérieur de l'amphithéâtre**

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



Localisation des capteurs dans l'amphithéâtre

La campagne de mesure a commencé 15 février 2024 et s'est terminée le 11 février 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).

4.2 Résultats

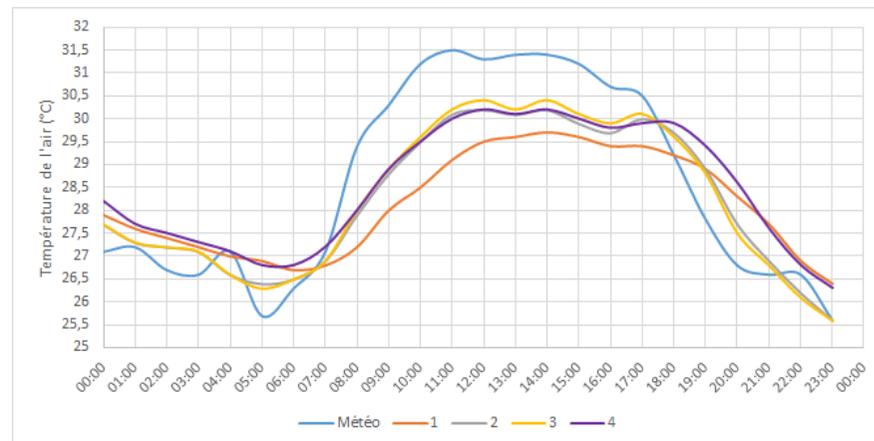
Voici les résultats de cette campagne de mesure du confort en pourcentage de valeurs en dessous de 20°C et au-dessus de 28°C, 30°C et 32°C :

CAMPAGNE ESTIVALE (01/11 -> 30/04)				
Nom local	<20°C	>28°C	>30°C	>32°C
Donéé Météo	0,00%	13,21%	5,56%	0,39%
Scène	0,00%	5,35%	0,08%	0,00%
Amphi gauche	0,00%	24,25%	2,03%	0,04%
Amphi droite	1,09%	13,26%	1,30%	0,02%
Fond amphi	0,00%	27,60%	3,90%	0,26%
CAMPAGNE HIVERNALE (01/05 ->31/10)				
Nom local	<20°C	>28°C	>30°C	>32°C
Donéé Météo	3,55%	0,83%	0,03%	0,00%
Scène	1,30%	0,14%	0,00%	0,00%
Amphi gauche	2,12%	0,91%	0,00%	0,00%
Amphi droite	2,08%	0,73%	0,00%	0,00%
Fond amphi	0,69%	0,00%	0,00%	0,00%

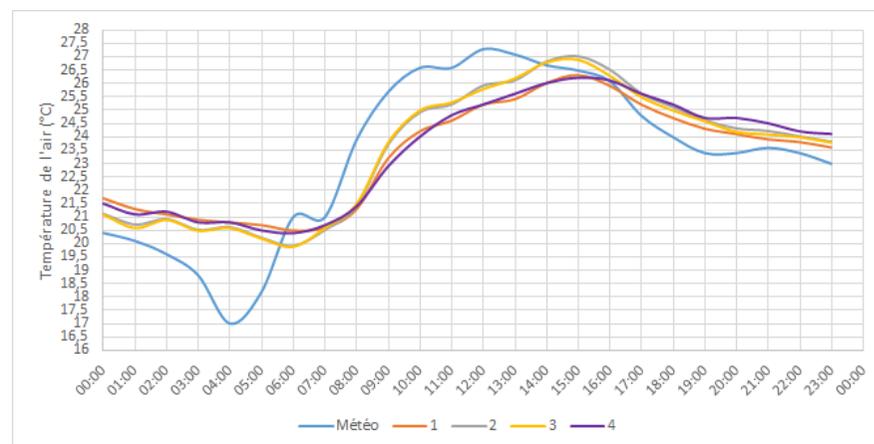
Résultats de la campagne de mesure confort Amphithéâtre Moufia

On note que les températures d'air intérieur sont toujours inférieures aux données météorologiques. En effet, on constate que le pourcentage de points au-dessus de 30°C et 32°C dans la campagne estivale est moindre par rapport aux températures extérieures. Néanmoins pour les données au-dessus de 28°C, les valeurs intérieures sont supérieures aux données météorologiques. Ceci est due à deux éléments : une occupation partielle couplée à une inertie structurelle par le socle maçonné de l'amphithéâtre.

Voici deux courbes d'évolution des températures d'air pour une journée chaude et froide en mode occupée.



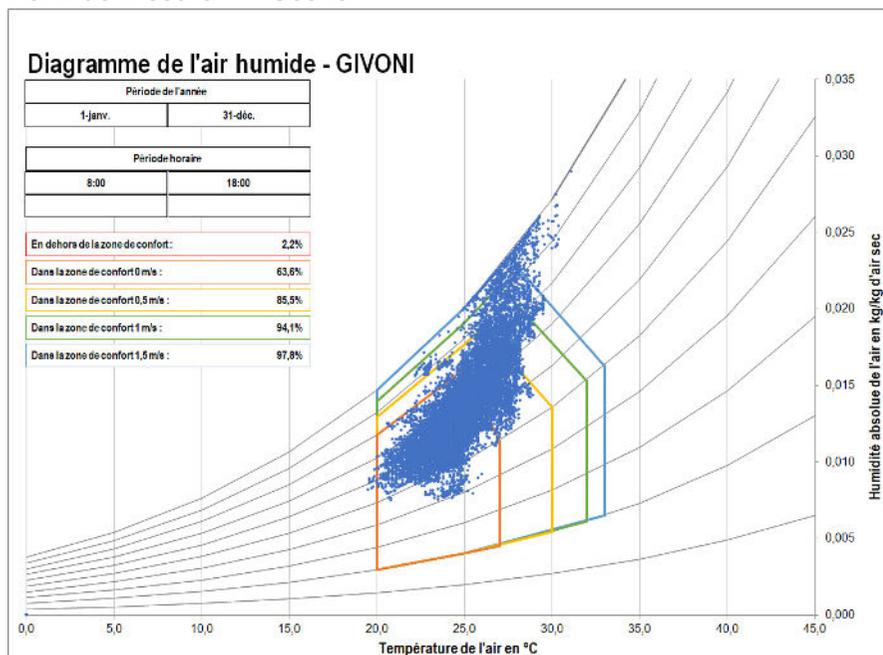
Evolution de la température d'air pour une journée chaude (16 février 2024)



Evolution de la température d'air pour une journée froide (19 septembre 2024)

Les diagrammes de Givoni sont une représentation graphique des données de la campagne de mesure uniquement sur la période d'occupation de l'amphithéâtre entre 8h et 18h sur une année quasi complète (il manque 3 jours en février). Au-delà de l'analyse des simples températures intérieures, ces diagrammes intègrent la donnée humidité relative. Le couple température d'air / humidité relative fait partie des paramètres physiques (en plus de la vitesse d'air, la vêtue et le métabolisme) principaux impactant le confort des usagers. Tous les points situés dans les différents polygones correspondent à des conditions température/humidité pour lesquelles les usagers devraient être en situation de confort lorsqu'une certaine vitesse d'air est disponible.

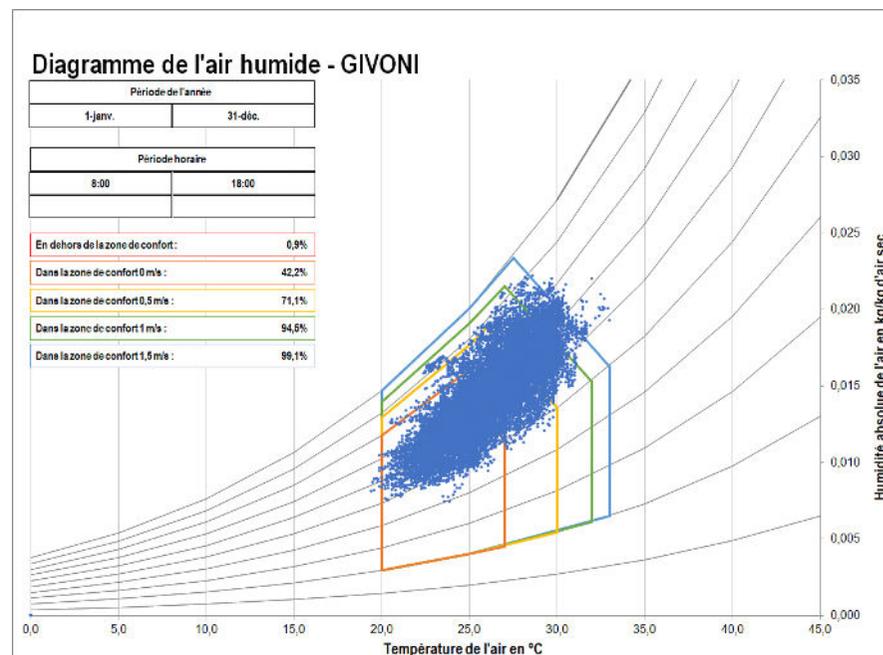
Point de mesure 1 – Scène



Représentation graphique Givoni du point de mesure 1 « Scène »

Pour le point de mesure « Scène », on constate une humidité relative importante comparé aux autres points de mesure avec des gammes de températures faibles. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette partie de bâtiment est entièrement en structure béton et que ceci apporte une inertie certaine et que le point de mesure est situé dans une zone mal ventilée comparé aux autres capteurs. De plus, les charges internes sont moins importantes en densité que les autres parties de l'amphithéâtre.

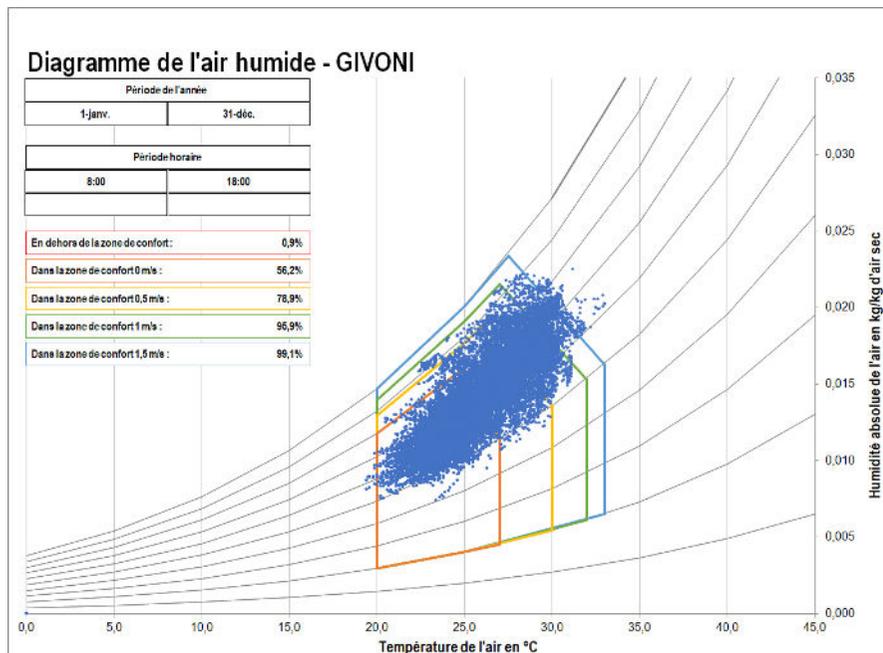
Point de mesure 2 – Amphi droite



Représentation graphique Givoni du point de mesure 2 « Amphi Gauche »

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

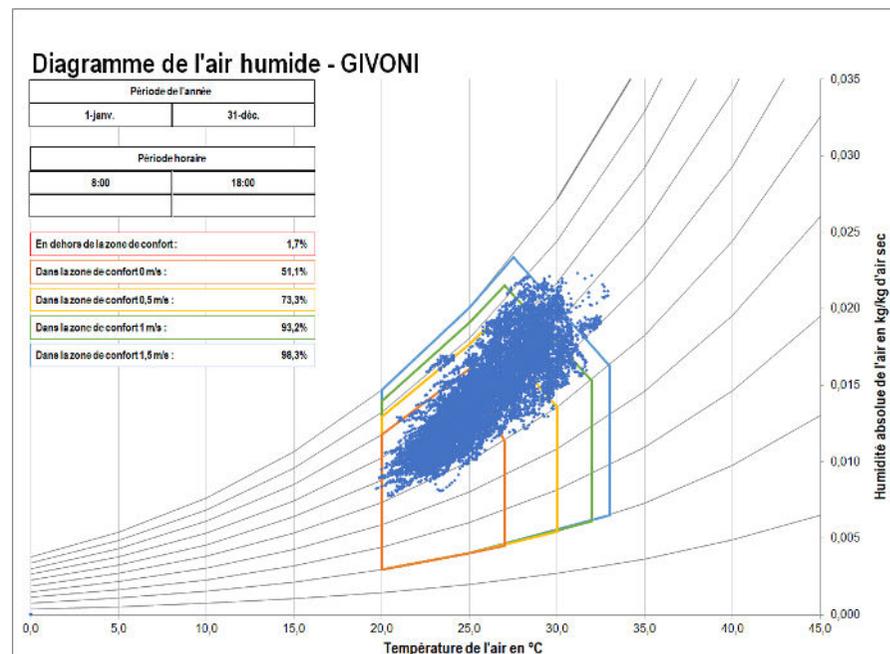
Point de mesure 3 – Amphi gauche



Représentation graphique Givoni du point de mesure 3 « Amphi Droite »

Les résultats sont quasi-identiques avec le point 2, on constate des gammes de températures n'excédant pas les 32°C avec un confort dans la zone Givoni 1m/s de 95,9%.

Point de mesure 4 – Amphi fond



Représentation graphique Givoni du point de mesure 4 « Amphi Fond »

Dans le fond de l'amphithéâtre, on constate un confort un peu moins bon comparé aux autres points de mesure mais ceci reste dans une zone de confort Givoni 1m/s de 93,2%.

4.3 Conclusion

Le diagnostic thermique de l'Amphithéâtre du Moufia à Saint-Denis a mis en évidence que ce bâtiment est clairement confortable une grande partie de l'année. Il est à noter que spécifiquement sur le site du Moufia, le président de l'Université a mis en place du télétravail en période chaude pour les locaux de l'Université qui sont inconfortables. L'amphithéâtre reste quant à lui ouvert car le bâtiment reste confortable pour les usagers. La conception aéraulique avec un canyon dépressionnaire permet ainsi d'assurer une bonne décharge thermique et ainsi avoir des gammes de températures équivalentes à la température extérieure. L'instrumentation aéraulique réalisée dans le cadre de ce projet a permis de mettre en évidence de forts de renouvellement d'air assurant aisément cette décharge thermique.

Nous avons pu constater que la socle béton important permet d'apporter une certaine inertie au bâtiment permettant « d'amortir » les pics de température extérieur. En effet, on remarque que les températures extrêmes (supérieur à 32°C) sont bien inférieures en occurrence entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Ceci est d'autant plus vrai pour la partie « scène » avec une part maçonnerie plus importante qui va lisser la température d'air comparée à la partie assise de l'amphithéâtre où l'on retrouve des façades périphériques en bois. On notera tout de même que les charges internes sont en proportion moins fortes dans la partie scène et que le potentiel de ventilation naturelle est également variable et moins fort dans cette partie d'amphithéâtre.

De plus, on observe également que la décharge thermique du bâtiment n'est pas immédiate et qu'il pourrait être intéressant, pour optimiser le confort thermique des usagers, de s'assurer qu'en non-occupation

(nuit), le canyon à l'extraction et les admissions restent bien ouvertes en période estivale pour avoir une décharge thermique plus conséquente et ainsi retrouver une température d'air intérieur équivalente à la température extérieure en matinée. Ceci est bien entendu à coupler avec les précipitations.

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 caractéristiques des charges internes et des compositions de parois renseignées dans le modèle numérique de l'amphithéâtre du Moufia.

Type de pièce	Nb personnes	Planning d'occupation	Eclairage	Planning d'éclairage	Equipement	Planning d'équipement
Scène et Gradins	100	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7 Hors période de vacances scolaires	4 W/m ²	OFF	114 W/personne	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7
Bureaux	6	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7	4 W/m ²	OFF	114 W/personne	100% de 8h à 12h et 13h à 17h, 5j/7
Accueil / WC / Vestiaires	1	20% de 8h à 17h, 5j/7	3 W/m ²	100% de 8h à 17h, 5j/7	0 W	OFF

	Toiture terrasse	Canyon dépressionnaire	Toiture zinc	Mur ossature bois	Mur canyon dépressionnaire	Jalousie
Composition (int. → ext.)	Dalle Béton 20 cm Revêtement d'étanchéité	Dalle Béton 20 cm Revêtement d'étanchéité	Bois 2,5 cm Lame d'air Isolant Plaque de zinc	Bois 2,5 cm Laine minérale 10cm Lame d'air Bois 2,5cm	Bois 2,5 cm Revêtement métal	Verre clair 3 mm
Caract. thermiques	Rth = 0.18 m ² .K/W	Rth = 0.18 m ² .K/W	Rth = 2.01 m ² .K/W	Rth = 3.82 m ² .K/W	Rth = 0.17 m ² .K/W	S ₀ = 0.83 S ₀ = 0

Une fois le modèle numérique réalisé, il faut le 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, Maâréva. *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 le modèle numérique représente 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 le bâtiment entièrement climatisé :

- 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.

<i>Conception 1 & 2</i>		
	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 2	2,5 m ² .K/W
Renouvellement d'air	30 vol/h	10 vol/h

*Les résistances thermiques déjà supérieures à 2,5 m².K/W restent inchangées

Les 5 scénarios sont présentés ci-dessous.

<i>Scénarios pour chaque conception</i>						
		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.

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

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

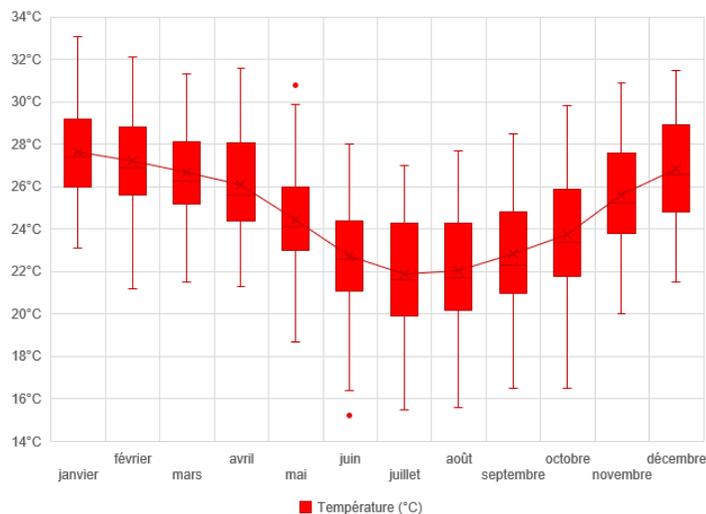
La surface utile à climatiser dans ce cas est évaluée à **508 m²**.

Pour une telle surface, nous faisons l'hypothèse qu'un groupe d'eau glacée aurait été utilisé si le bâtiment avait été climatisé.

5.2 Résultats

5.2.1 Données météorologiques sur l'année de mesure

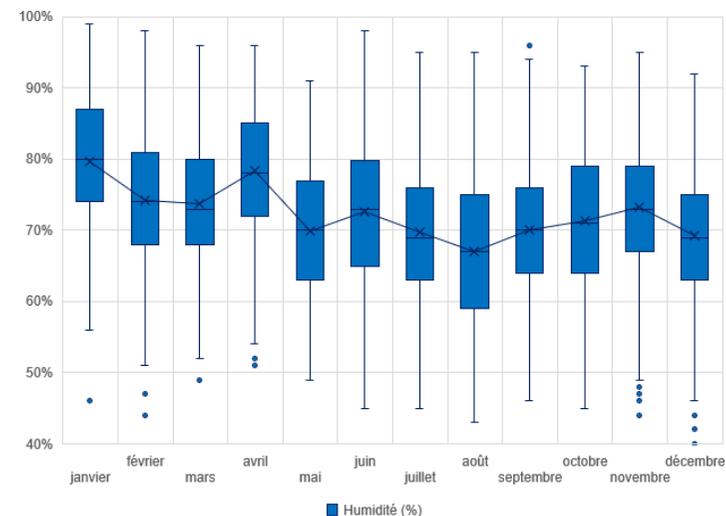
Les données météorologiques proviennent de la station de météo France de l'aéroport de Gillot 2024-2025. On constate que les températures dépassent les 30 °C régulièrement durant les mois de décembre à mars, et sont régulièrement inférieures à 20 °C entre juin et septembre. Gillot est globalement exposé à de fortes températures, ayant un impact sur le confort thermique si les bâtiments sont mal conçus.



Température extérieure à l'aéroport de Gillot sur 2024

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

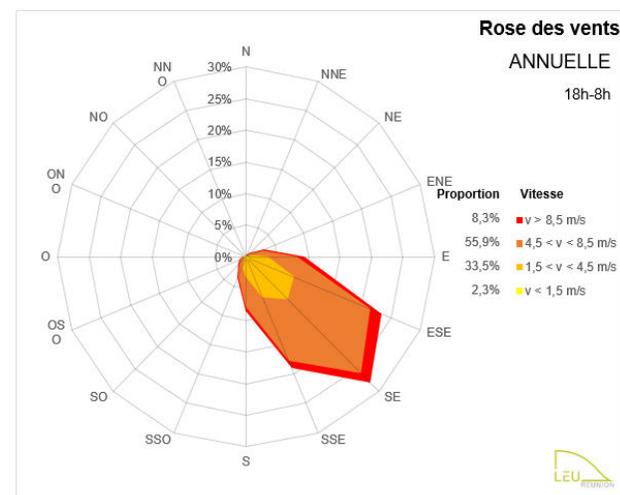


Humidité relative à l'aéroport de Gillot en 2024

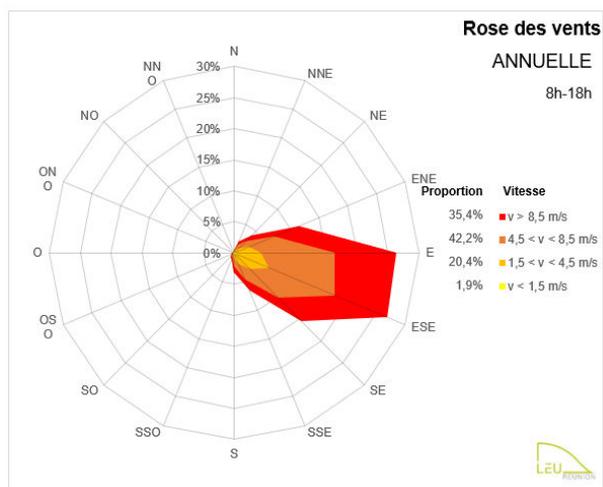
Projet ASPIRHAUT- OMBREE

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%.

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.



Rose des vents à l'aéroport de Gillot

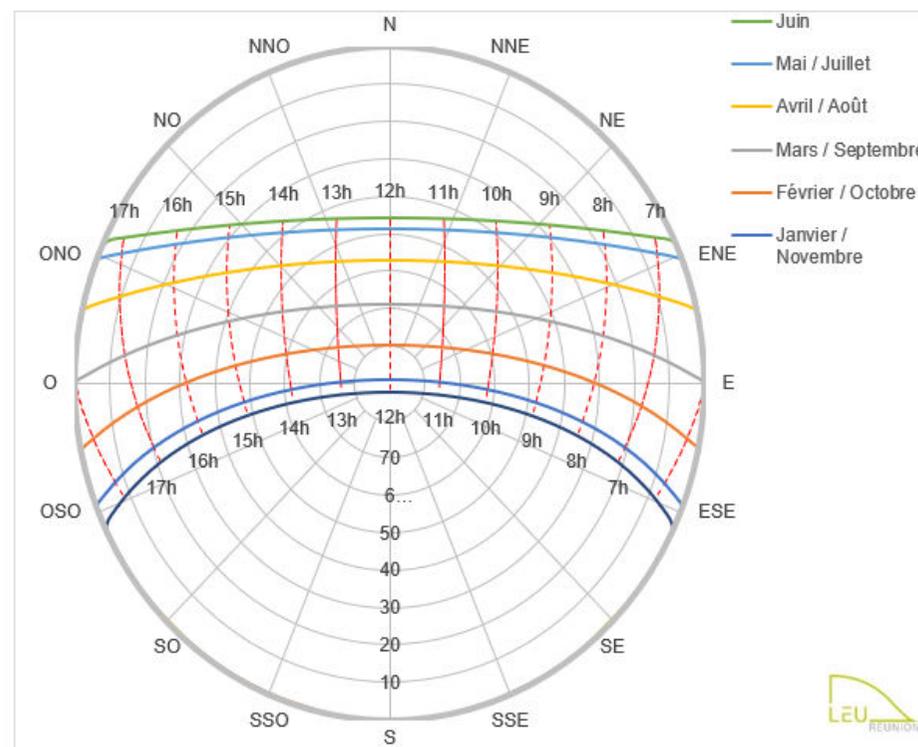


² Le potentiel de ventilation naturelle représente la proportion du temps sur l'année où le vent mesuré est supérieur ou égal à 2,5 m/s.

Projet ASPIRHAUT- OMBREE

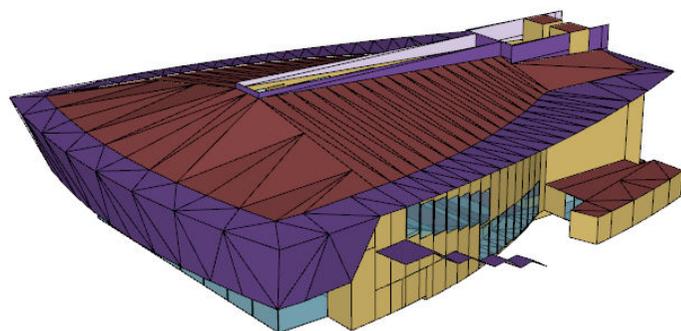
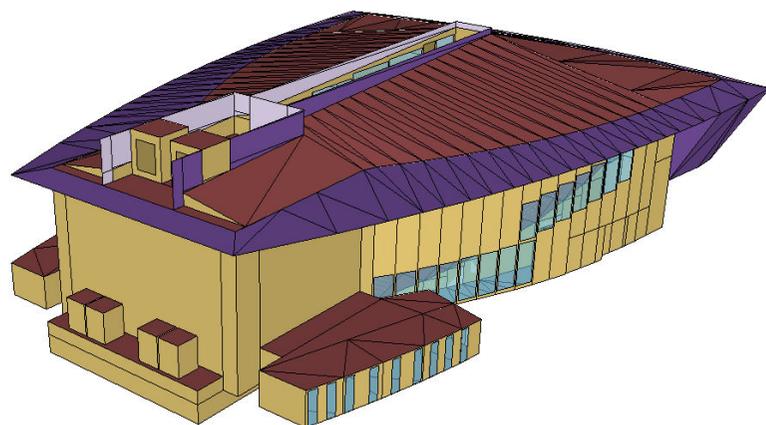
La course du soleil à La Réunion est caractérisée par un soleil haut dans le ciel, au Sud, pendant la saison chaude, entre novembre et janvier. Le reste du temps, le soleil est au Nord, avec un soleil plus rasant en juin.

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.



Course du Soleil à La Réunion

5.2.2 Modélisation du cas d'étude et recalage



Modèle thermique de l'amphithéâtre

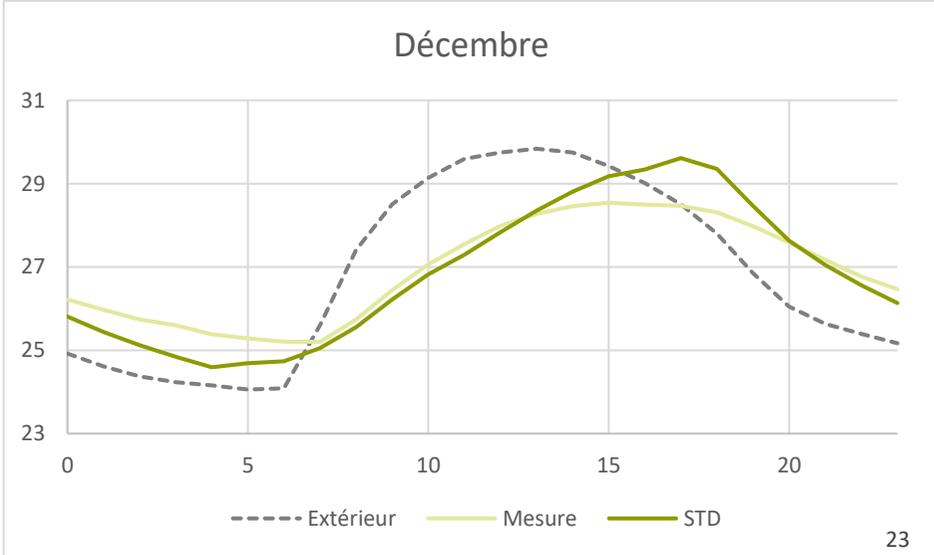
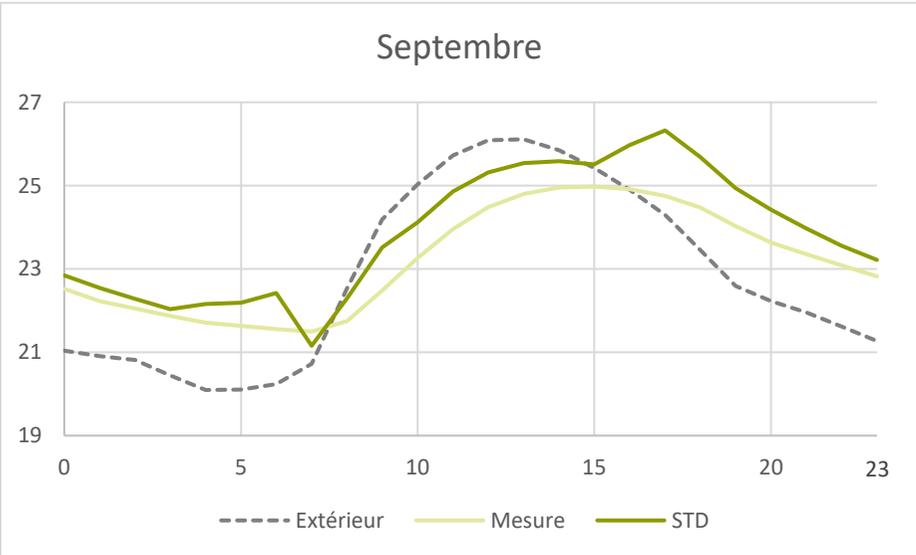
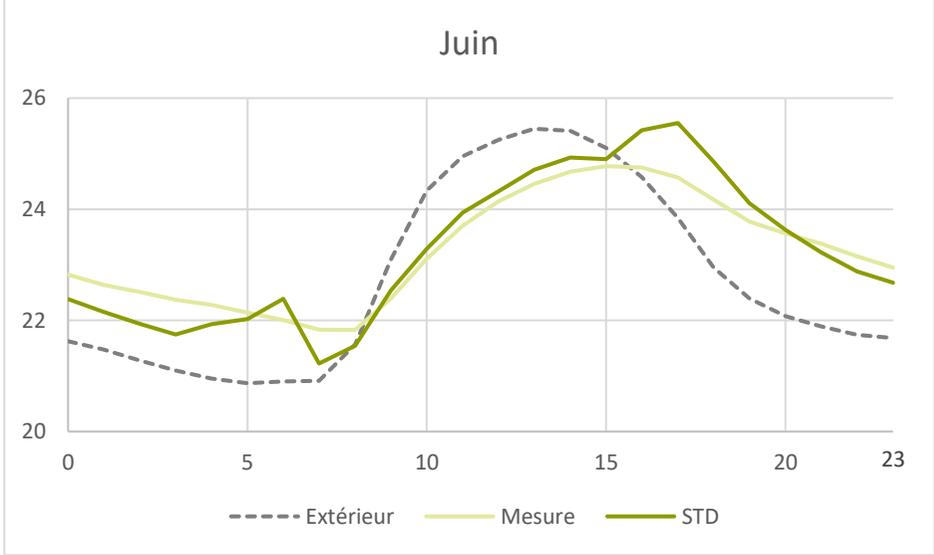
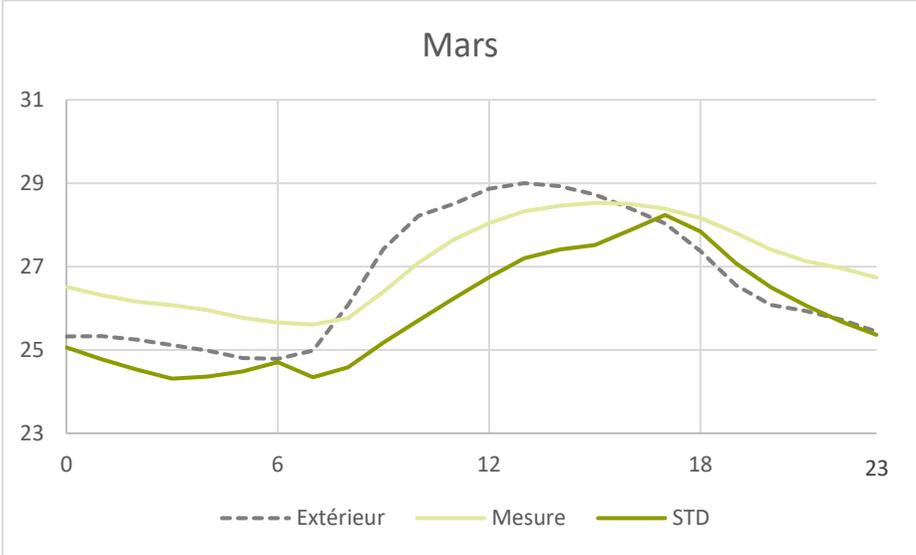
Nous avons comparé les résultats simulés en température/humidités avec les données réellement enregistrées par nos capteurs sur l'année 2024-2025. Les métriques de validation obtenues sont résumées dans le tableau ci-après :

Métriques de calibration

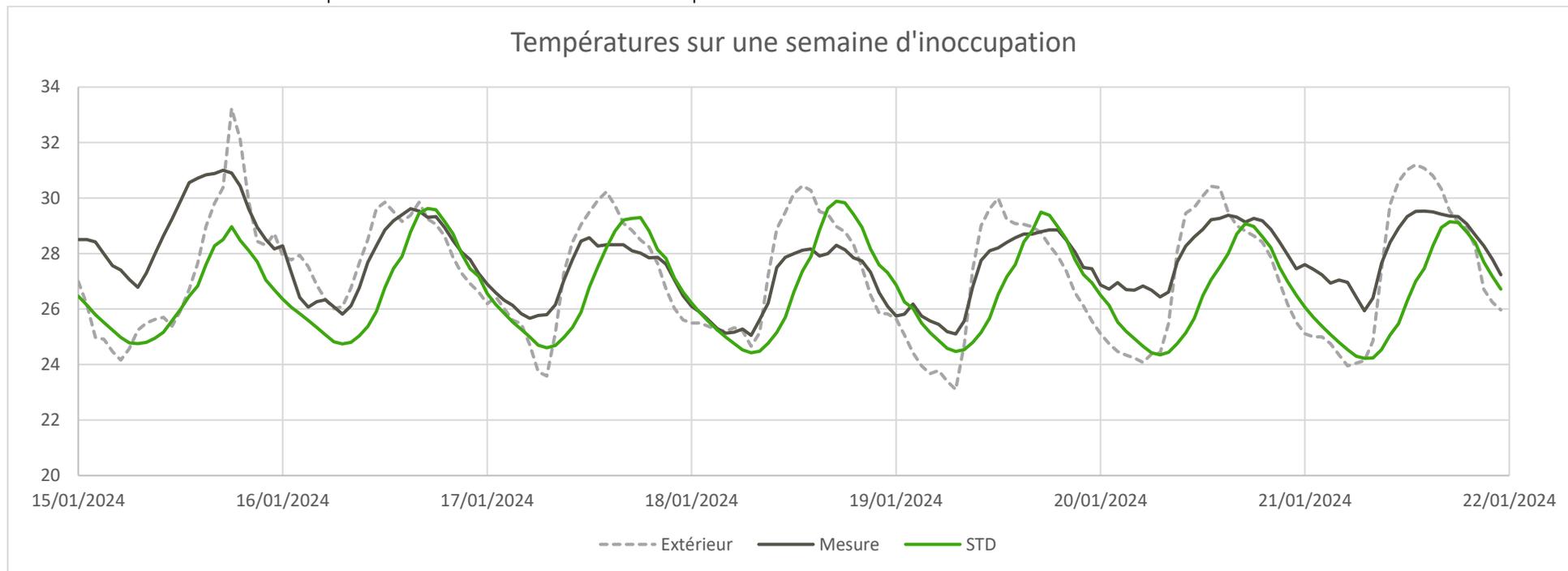
Indicateur	Définition	Objectif	Valeur de l'indicateur	Unité
NMBEh	Erreur moyenne normalisée	Doit tendre vers 0	-1,18	%
CV(RMSE)h	Coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne	< 30%	16,33	%
R²	Coefficient de détermination	> 65%	65,71	%
MBE	Moyenne des écarts	Doit tendre vers 0	-0,23	°C
MAD	Moyenne des écarts absolus	Doit tendre vers 0	1,20	°C

D'après les valeurs de métriques obtenues, le modèle de référence est considéré comme validé.

Ci-dessous les courbes de comparaisons STD/mesures horaires moyennées des journées de mars, juin, septembre et décembre pour l'amphithéâtre.



Ci-dessous les courbes de températures sur une semaine d'inoccupation.



Températures sur une semaine inoccupée

5.3 Résultats par scénario

Les résultats sont scindés en deux parties :

- Comparaison du confort (conditions hygrothermiques) entre les scénarios 1a et 2a (les deux scénarios non climatisés),
- Comparaison des besoins frigorifiques entre les autres scénarios (scénarios climatisés).

5.3.1 Confort hygrothermique

Les différences en termes de confort, entre les deux conceptions (conception actuelle « 1 » et conception optimisée pour la climatisation « 2 ») sont données dans le tableau suivant. Les valeurs ont été calculées sur l'année, sur les jours de semaine uniquement, de 8h à 18h.

Confort hygrothermique - Conception actuelle VS optimisée climatisation

Conception	Amphithéâtre		
	Conception actuelle (1a)	Conception climatisation (2a)	Ecart 1 vers 2
% de temps de confort à 0 m/s	34,1%	28,8%	-5,3%
% de temps de confort à 0,5 m/s	68,5%	64,1%	-4,4%
% de temps de confort à 1 m/s	93,5%	90,5%	-3%
% de temps de confort à 1,5 m/s	98,3%	98,2%	-0,1%
Nombre d'heures avec T > 28 °C	404 h	336 h	-68 heures
Nombre d'heures avec T > 30 °C	77 h	74 h	-3 heures
Nombre d'heures avec T > 32 °C	2 h	1 h	-1 heure

*En nombre d'heures sur la période d'occupation (2088 heures au total)

Le pourcentage d'heures de confort diminue systématiquement dans le cas d'une conception optimisée pour la climatisation (2a) par rapport à la conception actuelle (1a), quel que soit le niveau de vitesse d'air.

Ces résultats montrent que la conception actuelle (1a) offre déjà un niveau de confort élevé, avec plus de 93 % des heures confortables à une vitesse d'air de 1 m/s, et plus de 98 % à 1,5 m/s. Le passage en conception climatisation n'apporte donc aucun gain significatif en matière de confort perçu, et présente même une légère dégradation des performances, notamment à faible vitesse d'air.

Du point de vue thermique pur (température de l'air), la conception optimisée pour la climatisation (2a) permet une réduction des heures de surchauffe, particulièrement pour le seuil de 28 °C (-68 h). Cependant, cet effet s'atténue pour les seuils plus élevés, ce qui indique que la conception actuelle est déjà performante pour limiter les pics de températures.

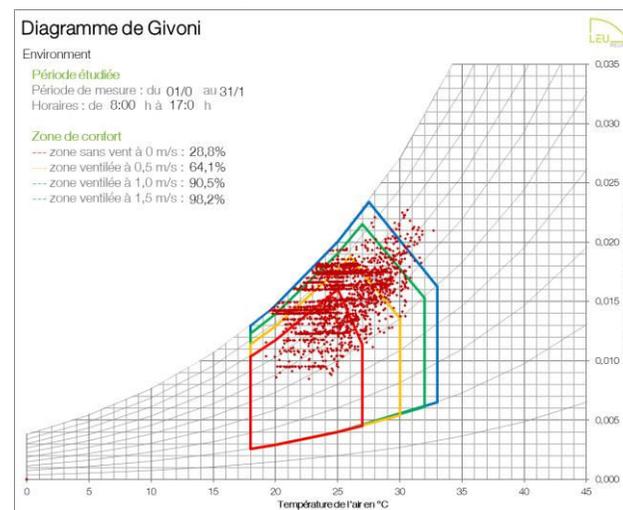
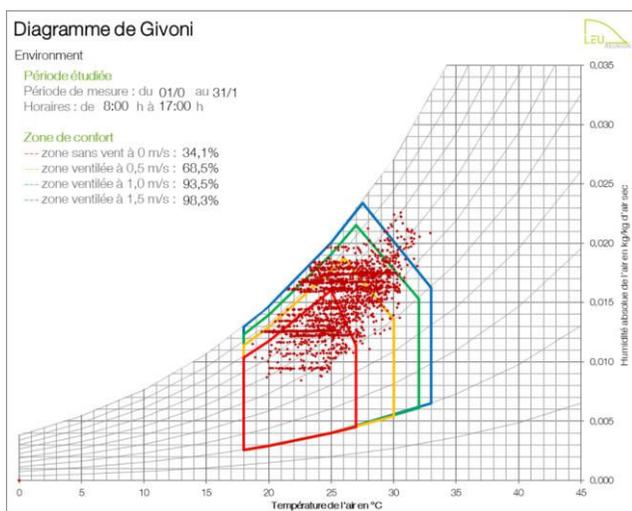
Les écarts observés entre les deux conceptions, que ce soit en termes de taux de confort ou de dépassements des seuils de température, restent relativement faibles. Cette faible variation peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- **Des caractéristiques thermiques similaires** : la résistance thermique des parois dans la conception actuelle est proche de celle de la conception climatisation ce qui l'impact sur les transferts de chaleur à travers l'enveloppe.
- **Une porosité élevée identique** : la forte porosité, inchangée entre les deux conceptions, atténue l'effet de la perméabilité à l'air. Les infiltrations d'air ne varient pas significativement et n'influencent que marginalement les performances thermiques.
- **Des protections solaires déjà optimisées** : la « conception actuelle » comporte déjà des protections solaires efficaces, ce

qui limite les apports solaires directs par les vitrages. De ce fait, le passage d'un simple à un double vitrage n'entraîne qu'une amélioration marginale.

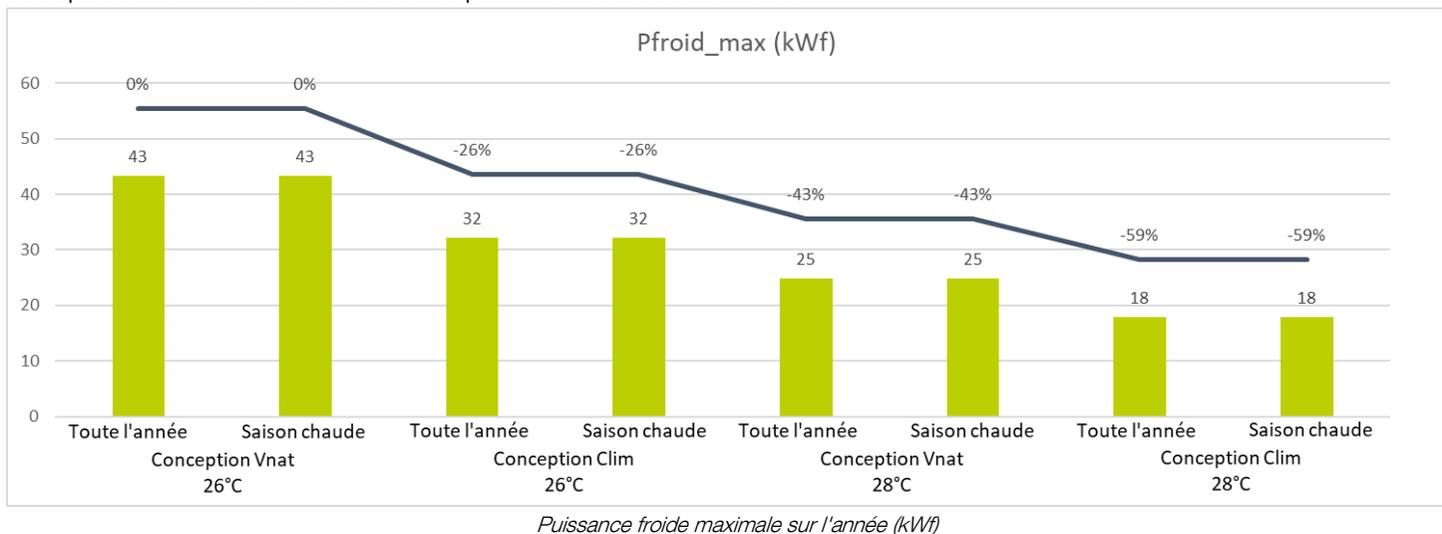
Amphithéâtre – Scénario 1a

Amphithéâtre – Scénario 2a



5.3.2 Besoins frigorifiques (en cas de climatisation) : Puissance froid maximale

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, dans ce cas, de réduire de 26% P_{froid_max},
- Passer d'une consigne de 26°C à 28°C permet, dans ce cas, de réduire de 43% P_{froid_max}.
- Augmenter la consigne à 28°C (-43%) a plus d'impact qu'optimiser la conception (-26%),
- La combinaison « conception optimisée pour la climatisation » + « consigne remontée à 28°C » permet, dans ce cas, de gagner presque 60% sur P_{froid_max}.

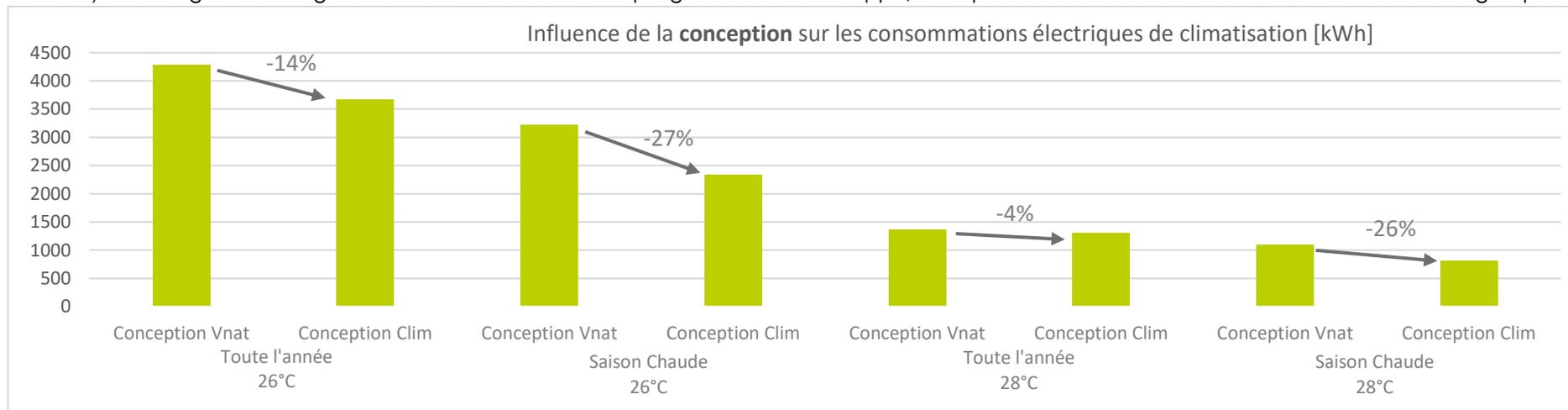
Le tableau synthétique ci-dessous reprend les éléments expliqués en intégrant également un ratio surfacique sur la base d'une surface climatisée de 508 m².

Puissance froide maximale par scénario

	Conception Vnat, 26°C (Cas_réf)	Conception Clim, 26°C	Conception Vnat, 28°C	Conception Clim, 28°C
P_{froid_max} (kWf)	43.3	32.2	24.8	17.9
Différence VS Cas_réf	-	-26%	-43%	-59%
P_{froid surfacique} (Wf/m²clim)	85.2	63.3	48.7	35.2

5.3.3 Consommations électriques

La figure ci-dessous présente l'influence de la conception sur les besoins énergétiques. 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 4 à 27% les besoins énergétiques.

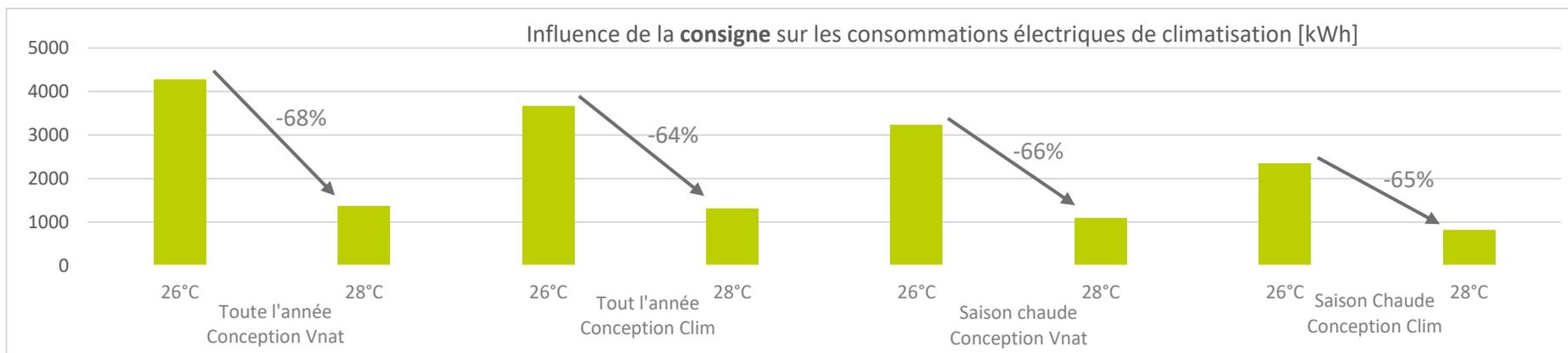


Influence de la conception sur les besoins énergétiques

La figure ci-dessous présente l'influence de la température de consigne sur les besoins énergétiques. L'augmentation de 2 °C de la consigne de température permet théoriquement de réduire les besoins énergétiques de 64 à 68%.

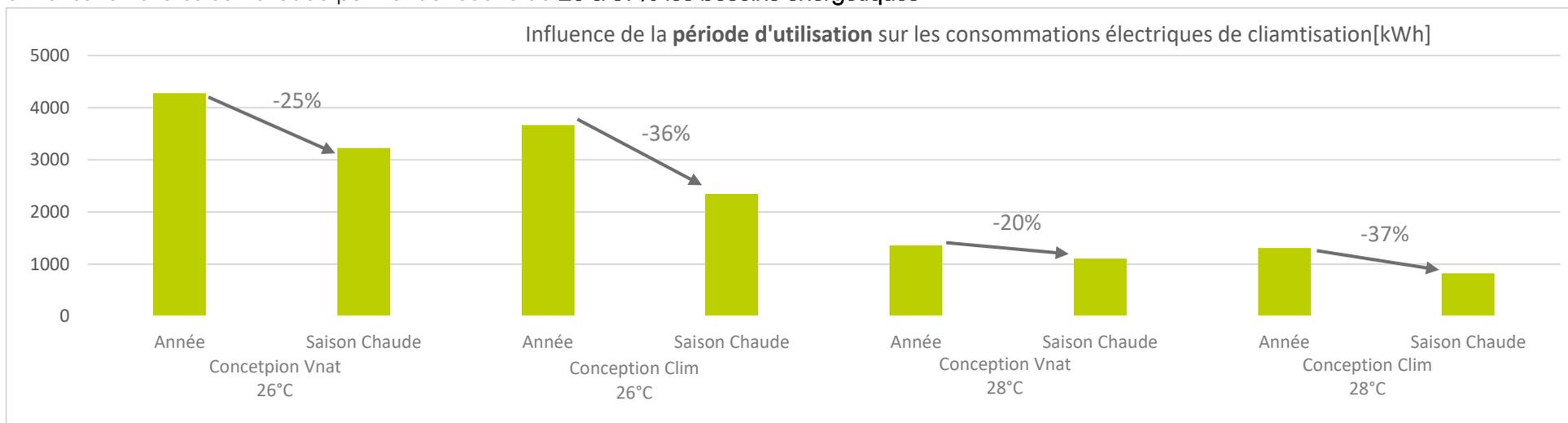
Cette grande différence s'explique par deux facteurs :

- En passant la consigne de 26°C à 28°C, on réduit le nombre d'heures climatisées (-17% en saison chaude, -14% 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 (-43% sur la puissance frigorifique maximale appelée).



Influence de la consigne sur les besoins énergétiques

Le dernier paramètre étudié est l'influence de la période d'utilisation de la climatisation sur l'année sur les besoins énergétiques. Limiter l'usage de la climatisation à la saison chaude permet de réduire de 20 à 37% les besoins énergétiques.

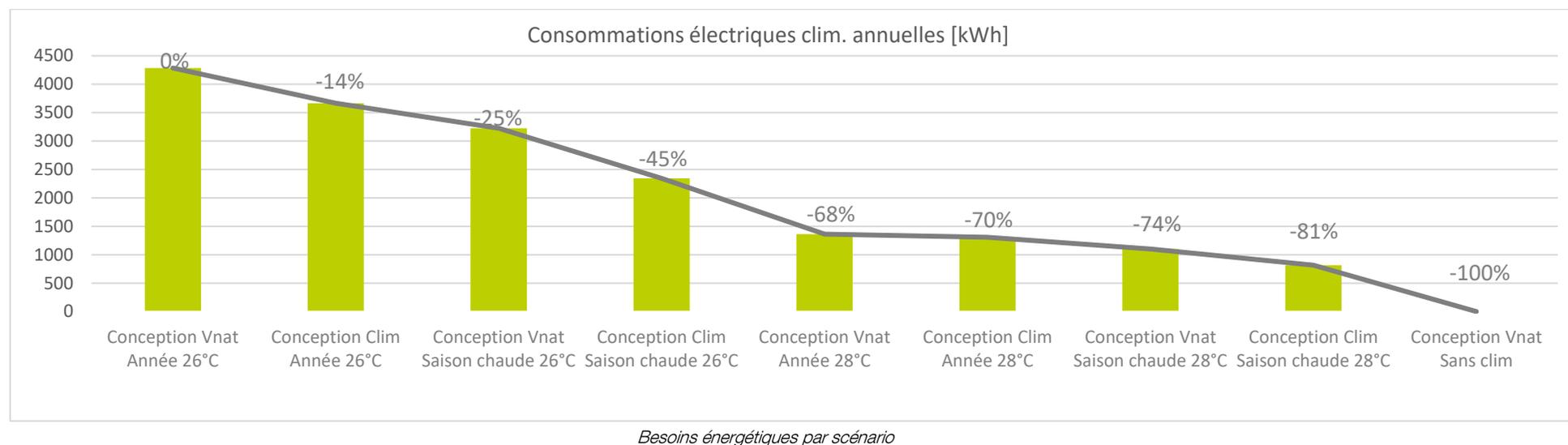


Influence de la période d'utilisation de la climatisation sur les besoins énergétiques

Pour récapituler, les tendances sont les suivantes :

- Toute chose égale par ailleurs, ce bâtiment conçu pour la ventilation naturelle a des besoins énergétiques plus importants que s'il avait été conçu « classiquement », si les deux sont climatisés ; **4 à 27% de besoins énergétiques** en moins pour une **conception adaptée**,
- Passer d'une consigne de **26 °C à 28 °C** permet de réduire de **64 à 68% les besoins énergétiques**,
- Réduire l'usage de la climatisation aux 5 mois les plus chauds de l'année (novembre – mars) permet de réduire de **20 à 37% les besoins énergétiques**.

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



	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 clim. (kWhe)	4 285	3 667	3 227	2 346	1 362	1 306	1 099	818
Différence VS Cas_réf	-	-14%	-25%	-45%	-68%	-70%	-74%	-81%
Consommation électrique clim. surfactive (kWhe/m²clim)	8.4	7.2	6.4	4.6	2.7	2.6	2.2	1.6

Besoins énergétiques par unité surfacique par scénario

On constate que les besoins énergétiques sont réduits de **80%** entre « **conception Vnat + climatisation toute l'année à 26°C** » et « **conception Clim + climatisation en saison chaude à 28°C** », soit :

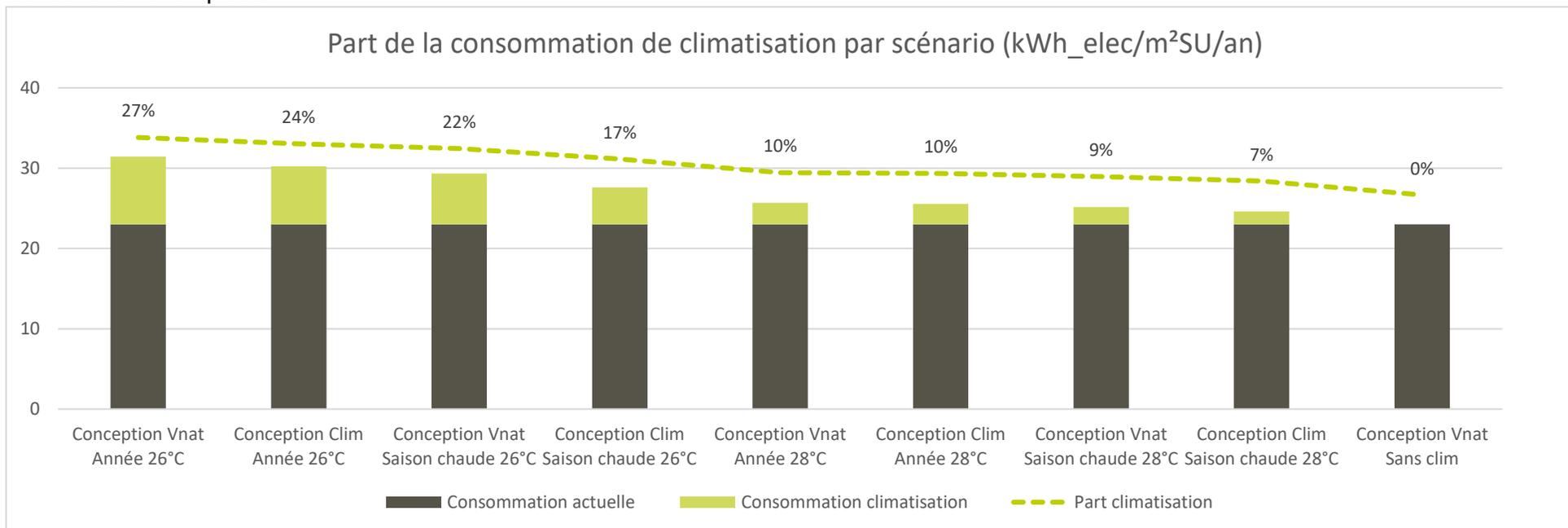
- De **4.3 MWh/an** à **0.8 MWh/an**,
- De **8.4 kWh/m²SU/an** à **1.6 kWh/m²SU/an**.

5.3.4 Economies réalisées

L'Université de La Réunion nous a fourni les informations liées à la consommation de l'amphithéâtre nous permettant de mettre en avant les économies réalisées quant à l'utilisation de la ventilation naturelle pour les locaux.

Nous obtenons donc une consommation électrique surfacique de 23 kWh_{élec}/m²SU/an pour l'amphithéâtre.

La figure ci-après met donc en avant la part de consommation de la climatisation par rapport à la consommation totale de l'amphithéâtre en fonction du scénario mis en place.



Projection de la consommation de l'amphithéâtre par scénario

Si le projet avait été équipé d'un système de climatisation (groupe d'eau glacée SEER = 3), la consommation de climatisation aurait pu représenter entre 7 et 27% de la consommation de l'amphithéâtre.

6 PRECONISATIONS

Le diagnostic thermique a montré que l'amphithéâtre bénéficie d'un bon confort la majeure partie de l'année grâce à sa conception aéraulique et à l'inertie du socle béton.

Toutefois, certaines améliorations peuvent être apportées pour optimiser encore la gestion du confort thermique, notamment en période estivale :

1. **Réparation des jalousies défectueuses** : Remplacer les jalousies et manivelles défectueuses afin de garantir un bon fonctionnement des admissions d'air et maximiser le potentiel de ventilation.
2. **Automatisation de l'admission en façade** : Mettre en place un dispositif d'automatisation des ouvertures à l'admission pour faciliter la gestion. Actuellement, le gestionnaire du site doit effectuer ces ouvertures manuellement, ce qui est fastidieux et chronophage, et peut entraîner une ouverture partielle des admissions, limitant ainsi l'efficacité du canyon.
3. **Amélioration du puits dépressionnaire** : Installer des ailettes dans le canyon dépressionnaire afin d'optimiser l'efficacité de l'extraction d'air, en particulier pour homogénéiser les vitesses d'air.

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

Amphithéâtre – 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	184 h	0 h	101 h	83 h	19 h	2 h	47 h
Février	160 h	0 h	80 h	80 h	22 h	0 h	61 h
Mars	168 h	0 h	141 h	27 h	7 h	0 h	42 h
Avril	176 h	0 h	130 h	46 h	8 h	0 h	56 h
Mai	176 h	0 h	175 h	1 h	0 h	0 h	40 h
Juin	168 h	2 h	166 h	0 h	0 h	0 h	86 h
Juillet	184 h	11 h	173 h	0 h	0 h	0 h	37 h
Août	168 h	4 h	164 h	0 h	0 h	0 h	54 h
Septembre	176 h	0 h	172 h	4 h	0 h	0 h	90 h
Octobre	184 h	0 h	179 h	5 h	0 h	0 h	65 h
Novembre	160 h	0 h	98 h	62 h	4 h	0 h	76 h
Décembre	184 h	0 h	88 h	96 h	17 h	0 h	58 h
Eté	1032 h	0 h	638 h	394 h	77 h	2 h	340 h
Hiver	1056 h						372 h
Annuel	2088 h	17 h	1667 h	404 h	77 h	2 h	712 h
Ratio	100,0%	0,8%	79,8%	19,3%	3,7%	0,1%	34,1%

Amphithéâtre – 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	184 h	0 h	123 h	61 h	19 h	1 h	29 h
Février	160 h	0 h	90 h	70 h	22 h	0 h	56 h
Mars	168 h	0 h	144 h	24 h	6 h	0 h	37 h
Avril	176 h	0 h	134 h	42 h	6 h	0 h	47 h
Mai	176 h	0 h	175 h	1 h	0 h	0 h	35 h
Juin	168 h	0 h	168 h	0 h	0 h	0 h	86 h
Juillet	184 h	11 h	173 h	0 h	0 h	0 h	29 h
Août	168 h	3 h	165 h	0 h	0 h	0 h	48 h
Septembre	176 h	0 h	172 h	4 h	0 h	0 h	85 h
Octobre	184 h	0 h	182 h	1 h	0 h	0 h	53 h
Novembre	160 h	0 h	107 h	53 h	7 h	0 h	73 h
Décembre	184 h	0 h	104 h	80 h	14 h	0 h	43 h
Eté	1032 h	0 h	702 h	330 h	74 h	1 h	285 h
Hiver	1056 h						336 h
Annuel	2088 h	14 h	1737 h	336 h	74 h	1 h	621 h
Ratio	100,0%	0,7%	83,2%	16,1%	3,5%	0,0%	29,7%