



**HAL**  
open science

# Caractérisation du confort microclimatique d'un espace de type galerie semi-ouverte

Ludovic Liberpré

► **To cite this version:**

Ludovic Liberpré. Caractérisation du confort microclimatique d'un espace de type galerie semi-ouverte. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03615449

**HAL Id: dumas-03615449**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03615449>**

Submitted on 21 Mar 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



# Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année 2020-2021

Voie d'approfondissement : Bâtiment

Soutenu le : 9 septembre 2021

Devant le jury composé de :

- Président du jury : Mohamed EL MANKIBI
- Maître de TFE : Richard CANTIN
- Expert : Gabriel REMION

Par :

**Ludovic LIBERPRÉ**

## Caractérisation du confort microclimatique d'un espace de type galerie semi-ouverte



# Notice analytique

AUTEUR			
Nom	LIBERPRÉ		
Prénom	Ludovic		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	/		
Nom du Tuteur	CANTIN Richard		
ANALYSE DU TFE			
Titre	Caractérisation du confort microclimatique d'un espace de type galerie semi-ouverte		
Title	Characterization of the microclimatic comfort of a semi-open gallery type space		
Résumé (français)	<p>Cette étude vise à caractériser le confort par la compréhension du microclimat de la galerie semi-ouverte que l'on retrouve dans des cloîtres par la modélisation sur un logiciel de mécanique des fluides : Ansys-Fluent. Il est possible sur ce dernier de construire la géométrie, et de modéliser l'évolution des flux d'air entrant dans la galerie afin de comprendre les mécanismes qui y ont lieu. Les conditions aux limites implémentées sont obtenues par des mesures sur site. Ces dernières permettent également de confronter le modèle à la réalité. A partir de ce modèle, différents paramètres (longueur, profondeur, hauteur, position du Soleil, configuration) seront modifiés afin d'analyser l'influence sur le microclimat de la galerie, dans le but de définir une conception optimale pour un usage extérieur dans des conditions caniculaires imputables au réchauffement climatique.</p>		
Abstract	<p>This study aims to characterize comfort by understanding the microclimate of the semi-open gallery found in cloisters by using Computational Fluid Dynamics (CFD) on Ansys-Fluent. It is possible on the latter to construct the geometry, and to model the evolution of the air flows entering the gallery in order to understand the mechanisms that take place there. The boundary conditions implemented are obtained by on-site measurements. The latter also make it possible to confront the model with reality. From this model, several parameters (length, depth, height, position of the Sun, configuration) will be modified to analyze the influence of each on the microclimate of the gallery, in order to define an optimal design for outdoor use under heat-sensitive conditions due to global warming.</p>		
Mots-clés	Galerie, microclimat, modélisation, température extérieure		
Key-words	Gallery, microclimate, modelling, outdoor temperature		
Termes géographique	Iran, Irak, Sardaigne, Andalousie, Oman, Algérie, Moyen-Orient, Singapour, Cévennes, Provence, Lyon, Venise, Paris		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. Biblio.
			32

# Déclaration de travail personnel

---

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

# Remerciements

---

A monsieur Richard CANTIN, enseigneur chercheur à l'ENTPE, pour m'avoir encadré et orienté avant et pendant la réalisation de mon TFE malgré cette période difficile où le télétravail s'imposait. Cela m'a permis de débiter cet exercice dans les meilleures conditions, puis d'orienter mon travail vers la bonne voie.

A monsieur Mohamed EL MANKIBI, enseignant chercheur à l'ENTPE, grâce à qui j'ai pu disposer de matériel expérimental pour mener la campagne de mesures nécessaire à l'étude. Par ses explications sur le matériel, cette phase du travail s'est déroulée dans les meilleures conditions.

A monsieur Jacques CHEMIN, ingénieur Sécurité-Bâtiment au musée des Beaux-Arts de Lyon, pour m'avoir permis d'accéder au cloître du musée pendant la période d'ouverture du musée, et pour m'avoir laissé réaliser les mesures dans le cloître malgré la gêne que cela pouvait occasionner pour les visiteurs, et en dépit de la longue période de fermeture du musée au public. Sans lui, la phase de mesure aurait été impossible, et aurait amputé l'étude d'une partie primordiale.

A monsieur Gabriel REMION, chargé d'étude et de recherche en ventilation des tunnels au CETU, pour avoir accepté de consacrer du temps pour prendre part au jury en tant qu'expert, afin de juger de la qualité du Travail de Fin d'Études, et de l'atteinte du niveau d'ingénieur.

# Table des matières

---

<b>Notice analytique</b> .....	<b>2</b>
<b>Déclaration de travail personnel</b> .....	<b>3</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>4</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>5</b>
<b>Table des illustrations</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Emergence du sujet – Problématique du TFE</b> .....	<b>12</b>
1.1. La notion d’espace intermédiaire .....	12
1.1.1. Définition .....	12
1.1.2. Typologie.....	13
1.1.3. Tableau synthétique .....	19
1.1.4. Espaces retenus .....	19
1.2. Analyse bibliographique.....	20
1.2.1. La caractérisation du microclimat .....	20
1.2.2. Le volet psychologique .....	26
1.2.3. Conséquences sur les performances énergétiques du bâtiment .....	28
1.3. Démarche retenue .....	30
1.3.1. La problématique.....	30
1.3.2. Les objectifs .....	31
1.3.3. Les étapes du Travail de Fin d’Études.....	31
<b>2. Expérimentations in situ</b> .....	<b>34</b>
2.1. Choix du site de mesures .....	34
2.1.1. Description du site .....	34
2.1.2. Contexte climatique.....	35
2.2. Choix du jour de mesures .....	37
2.3. Mesures au niveau d’une arcade extérieure.....	38
2.3.1. Température de l’air au niveau d’une arcade extérieure.....	40
2.3.2. Vitesse de l’air au niveau d’une arcade extérieure .....	41
2.4. Mesures des températures de parois .....	42
2.5. Mesures au sein de la galerie .....	44
2.5.1. Température de l’air au sein de la galerie .....	44
2.5.2. Vitesse de l’air au sein de la galerie.....	45

2.6.	Hypothèses – Regard critique – Approfondissement des mesures .....	46
2.6.1.	Hypothèses additionnelles .....	46
2.6.2.	Approfondissement des mesures .....	47
2.6.3.	Regard critique sur les mesures.....	49
<b>3.</b>	<b>Construction du modèle de référence sur Ansys-Fluent .....</b>	<b>50</b>
3.1.	Présentation de l'interface .....	50
3.1.1.	Le pré-processeur .....	50
3.1.2.	Le solveur.....	51
3.1.3.	Le post-processeur.....	52
3.2.	Les équations utilisées dans le modèle.....	52
3.2.1.	Les équations de base.....	52
3.2.2.	Équations complémentaires utilisées.....	53
3.2.3.	Adaptation des équations au cas d'étude .....	56
3.3.	Réalisation du modèle du site de l'étude .....	57
3.3.1.	La géométrie .....	57
3.3.2.	Le maillage .....	60
3.3.3.	Le paramétrage du domaine .....	63
3.3.4.	Simulation.....	66
<b>4.</b>	<b>Résultats – Discussions .....</b>	<b>68</b>
4.1.	Confrontation de la simulation aux mesures in situ .....	68
4.1.1.	Confrontation de la tache solaire réelle à celle calculée .....	68
4.1.2.	Confrontation de la température au sein de la galerie .....	69
4.1.3.	Confrontation de la vitesse de l'air.....	72
4.2.	Analyse du confort au sein de la galerie .....	74
4.2.1.	Paramètres déterminant le confort.....	74
4.2.2.	Rôle de la position du Soleil sur le confort .....	74
4.3.	Influence de conception géométrique.....	77
4.3.1.	Présence d'ouvertures latérales et/ou d'entrée .....	77
4.3.2.	Impact de la longueur.....	80
4.3.3.	Impact de la hauteur.....	83
4.3.4.	Impact de la profondeur .....	86
4.3.5.	Discussions.....	89
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>92</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>94</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>96</b>

# Table des illustrations

---

Figure 1: de gauche à droite, atrium romain classique, atrium avec toit vitrée au niveau de l'ouverture et atrium isolé de l'intérieur du bâtiment.....	133
Figure 2 : Refroidissement par convection naturelle en été dans un atrium .....	14
Figure 3 : A gauche, un porche en corps bas du bâtiment, à droite un porche traditionnel de l'architecture cévenole.....	14
Figure 4 : Porches dans l'architecture religieuse ; à gauche sur le parvis d'une église, à droite l'« iwan » d'une mosquée iranienne .....	15
Figure 5 : De gauche à droite, cour intérieure d'un immeuble parisien, patio du palais de l'Alhambra, cour intérieure d'un campus universitaire .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 6 : A droite traboule du quartier de Croix-Rousse, à gauche, traboule du vieux Lyon .....	17
Figure 7 : A l'échelle du quartier, à gauche une galerie à Venise, à droite la galerie des Offices à Florence.....	18
Figure 8 : A l'échelle du bâtiment, à gauche le cloître du Grand Hôtel-Dieu de Lyon, à droite le cloître du musée des Beaux-Arts de Lyon .....	18
Tableau 1 : Classification des espaces intermédiaires .....	18
Figure 9 : Variables intrinsèques à la configuration géométrique affectant le niveau d'ombrage de la cour <sup>[9]</sup> .....	22
Figure 10 : Pourcentage des zones ombragées des murs en été <sup>[10]</sup> .....	22
Figure 11 : Mécanismes des arbres impactant le microclimat local .....	23
Figure 12 :Influence du ratio d'aspect sur la température en fonction des climat <sup>[16]</sup> .....	25
Figure 13 : Orientation de la cour intérieure par rapport à la course du Soleil .....	26
Figure 14 : De gauche à droite, la division de la Sardaigne en climats différents, la division en bâtiments vernaculaires différents et les échantillons des stations climatiques utilisées pour l'étude <sup>[19]</sup> .....	27
Figure 15 : A gauche les formes de cour rectangulaire étudiée <sup>[25]</sup> , à droite l'effet du changement de ratio d'aspect sur les besoins en refroidissement annuels.....	29
Figure 16 : Le modèle cylindrique pour le calcul d'absorption de chaleur des zones vertes <sup>[27]</sup> .....	29
Figure 17 : Un exemple de galerie semi-ouverte de type « cloître » : l'abbaye royale de Fontevraud	30
Diagramme 1 : Démarche de l'étude .....	32
Figure 19 :Site de mesure : à gauche sur le plan du cloître, à droite un aperçu de la galerie concernée .....	34
Figure 20 : Moyenne des températures et du cumul des précipitations dans la région Lyonnaise en été.....	35
Graphique 1 : Estimation du nombre de jours de canicule annuel en 2015, 2050 et 2100.....	35
Figure 21 : Evolution du nombre de jours de canicule annuel selon Météo France. En haut à gauche, à l'horizon 2030, en haut à droite, à l'horizon 2050 et en bas à gauche, à l'horizon 2080. ....	37
Graphique 2 : Hauteur du Soleil en fonction de son azimut le 21 juillet 2021 .....	38
Figure 22 : A gauche, l'arcade ouverte sur l'extérieure siège de la mesure, à droite, la tache solaire engendrée dans la galerie à 12h45, non biaisée par la végétation.....	38
Figure 23 : Vérification des valeurs affichées par les deux appareils de mesure.....	39
Figure 24 : Positon de l'expérimentateur par rapport à la sonde.....	40

Graphique 3 : Evolution de la température ambiante en fonction du temps à l'entrée de l'arcade. Les trois sessions de mesures sont superposées .....	40
Graphique 4 : Evolution de la vitesse de l'air en fonction du temps à l'entrée de l'arcade. Les trois sessions de mesures sont superposées.....	41
Graphique 5 : Evolution de la température de paroi en fonction du temps à l'intérieur de la galerie. Les trois sessions de mesures sont superposées .....	43
Figure 25 :A gauche, position de l'expérimentateur dans la galerie, à droite, hauteur de la sonde par rapport au sol .....	44
Graphique 6 : Evolution de la température de l'air en fonction du temps à l'intérieur de la galerie. Les trois sessions de mesures sont superposées .....	45
Graphique 7 : Evolution de la différence de température entre l'arcade ouverture sur le jardin et l'intérieur de la galerie. Les trois sessions de mesures sont superposées.....	48
Figure 26 : Interface du logiciel ANSYS.....	50
Tableau 2 : Critères de convergence d'une simulation .....	52
Figure 27 : Les résidus sur le solveur Fluent.....	52
Figure 28 : Dimensions de la galerie – Plan XY <sup>1</sup> .....	57
Figure 29 : Dimensions de la galerie – Plan ZY <sup>1</sup> .....	58
Figure 30 : La géométrie du modèle créé sous ANSYS – Design Modeler.....	58
Figure 31 : Profondeur de la tâche solaire engendrée dans la galerie en fonction de la hauteur du Soleil – Plan ZY.....	59
Figure 32 : Décalage de la tache solaire dans la galerie en fonction de l'azimut du Soleil – Plan ZX ...	60
Figure 33 : Tracé des taches solaires dans la galerie.....	60
Graphique 8 : Evolution du temps de simulation en fonction de la taille des volumes de contrôle ....	61
Figure 34 : Critères à respecter pour un maillage de bonne qualité.....	62
Figure 35 : Qualité du maillage selon sa qualité orthogonale.....	62
Figure 36 : En haut, la qualité orthogonale locale, en bas, les caractéristiques du maillage.....	63
Figure 37 : Illustration des sélections nommées, qui serviront à définir les conditions limites .....	63
Tableau 3 : Caractéristiques physiques de l'air paramétrées sous Fluent .....	64
Tableau 4 : Caractéristiques physiques du calcaire paramétrées sous Fluent.....	64
Tableau 5 : Récapitulatif des conditions aux limites implémentées sous Fluent.....	66
Tableau 6 : Valeurs initiales implémentées sous Fluent, exemple pour la session de 10h .....	66
Figure 38 : Choix des paramètres temporels de la simulation.....	67
Figure 39 : Comparaison de la tache solaire réelle (à gauche) et calculée (à droite) .....	68
Figure 40 : Distribution spatiale de la température au bout de 30 minutes de simulation. En haut, pour la session de 10h, au milieu pour celle de 12h45 et en bas, pour celle de 15h30 .....	70
Graphique 9 : Evolution de la température de l'air en fonction du temps à l'intérieur de la galerie. Les trois simulations sont superposées.....	71
Graphique 10 : Écart de température en valeur absolue entre le modèle et les mesures pour la température de la galerie.....	71
Figure 41 : Lignes de courant de l'air à l'issue des 30 minutes de simulation. En haut à gauche, pour la session de 10h, en haut à droite pour celle de 12h45 et en bas, pour celle de 15h30.....	73

Figure 42 : Distribution spatiale de température sur un plan horizontal situé à 1,5 m de haut pour la partie gauche, dans tout l'espace sur la partie droite. En haut la session de 10, au milieu celle de 12h45 et en bas celle de 15h30.....	75
Graphique 11 : Température maximale de la galerie – Ecart de température entre l'extérieur et la valeur maximale dans la galerie .....	77
Figure 43 : Distribution spatiale de la température sur un plan horizontal situé à 1,5 m de hauteur au bout de 30 minutes. En haut à gauche, la configuration de référence, en haut à droite, sans ouvertures latérales, en bas à gauche sans ouverture d'entrée, en bas à droite seulement avec les arcades ouvertes sur l'extérieur.....	78
Graphique 12 : Evolution de la température maximale de la galerie en fonction du temps pour des conditions limites identiques. Les quatre configurations sont superposées sur le même graphique..	79
Figure 44 : Distribution planaire de la température en fonction de la longueur de la galerie par nombre d'arcades croissant. Résultats à l'issue de la simulation .....	81
Graphique 13 : Impact de la longueur de la galerie sur sa température maximale intérieure. Les 8 cas d'études sont superposés sur le même graphique .....	82
Figure 45 : Distribution spatiale de la température en fonction de la hauteur de la galerie par hauteur croissante. Résultats à l'issue de la simulation .....	84
Graphique 14 : Impact de la hauteur de la galerie sur sa température maximale intérieure. Les 10 cas d'études sont superposés sur le même graphique .....	84
Graphique 15 : Évolution de la température asymptotique maximale de la galerie en fonction de sa hauteur .....	85
Figure 46 : Distribution planaire de la température en fonction de la profondeur de la galerie par profondeur croissante. Résultats à l'issue de la simulation.....	87
Graphique 16 : Impact de la profondeur de la galerie sur sa température maximale intérieure. Les 10 cas d'études sont superposés .....	88
Graphique 17 : Évolution de la température asymptotique maximale de la galerie en fonction de sa profondeur .....	88

# INTRODUCTION

Depuis plusieurs années maintenant, les travaux scientifiques enrichissent les connaissances sur la climatologie et la communauté alerte quant à l'urgence d'agir et de relever le plus grand défi de l'histoire de l'humanité : le changement climatique. La prise de conscience d'un tel changement s'initie dans les années 1960 où les scientifiques commencent à être écoutés. Aujourd'hui, ce sujet est devenu l'un des plus importants de notre société, il a largement dépassé la sphère scientifique, oriente nombre de décisions politiques et économiques, et incite des dizaines de millions de personnes à modifier leur mode de vie par conviction, alors même que les connaissances relatives à la climatologie sont aujourd'hui encore incomplètes. Il a de plus des impacts très concrets sur notre vie quotidienne.

En France métropolitaine par exemple, on constate ces dernières années une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes comme des tempêtes engendrant des inondations importantes, ou bien des épisodes de sécheresse et canicule de plus en plus fréquents en période estivale. Durant cette période de l'année, notre rapport à l'environnement extérieur est en profonde mutation. En effet, à l'instar de certains pays au climat chaud depuis des millénaires, les gens tendent à rester à l'intérieur pendant une large partie de la journée, là où le confort thermique est optimal et contrôlé, pour ne finalement sortir qu'en soirée ou à l'aube, ou bien à vivre dans des espaces extérieurs offrant un sentiment de fraîcheur particulier en cas de forte chaleur. Face à ce constat, il devient impératif de proposer des espaces intermédiaires accessibles à tous et confortables d'un point de vue thermique en période estivale afin d'être en mesure de s'adapter au réchauffement climatique. Cela permettrait à la population de continuer à vivre en dehors d'un bâtiment même dans des étés qui seront de plus en plus chauds.

C'est dans ce contexte que mon choix s'est porté sur l'étude microclimatique d'un espace intermédiaire particulier, afin d'en comprendre les mécanismes qui apportent un confort en cas de forte chaleur : la galerie extérieure. Cette étude propose une modélisation fine en 3 dimensions de cet espace – la taille des mailles étant de 0,8 m de côté en moyenne – sur un logiciel de mécanique des fluides. L'évolution de la température au sein de la galerie dépend de plusieurs conditions limites que sont la vitesse et la température de l'air entrant dans la galerie et la température des parois, qui seront mesurées sur site. L'évolution de la température au sein de l'espace est également mesurée dans le but de la comparer avec celle prédite par le logiciel afin de tester la fiabilité du modèle simulé. Le but final de l'étude est de trouver la conception de la galerie offrant un confort thermique estival optimal.

L'étude se divise en plusieurs grandes phases :

- Une analyse bibliographique approfondie, afin de voir quels espaces ont déjà fait l'objet d'études semblables et ce qu'il en ressort, ce qui permet de s'aventurer sur un sujet quasiment inexploré jusqu'à maintenant, puis de définir la problématique, les objectifs de l'étude ainsi que la démarche à suivre pour y répondre.
- Le choix du site de mesures, ainsi que la description du protocole expérimental ainsi que la critique des résultats obtenus.

- La construction progressive du modèle sur le logiciel Ansys - Fluent, en expliquant quels mécanismes régissent celui-ci aux différentes étapes que sont la construction de la géométrie, le maillage, et le paramétrage et la résolution des équations de la mécanique des fluides.
- Une analyse des résultats obtenus par les mesures aussi bien que par les simulations et les conclusions que l'on peut tirer quant à la conception de cet espace particulier.

# 1. Emergence du sujet – Problématique du TFE

## 1.1. La notion d'espace intermédiaire

### 1.1.1. Définition

Les espaces intermédiaires sont des espaces de transition dans le bâtiment. Celle-ci peut être une transition entre l'espace public et le logement privé, entre l'espace intérieur et l'espace extérieur, entre l'intimité et la représentation sociale. Ces espaces ont pu être caractérisés comme des « espaces privés visibles de l'espace public (balcons, couvertures en terrasse, etc.) ou d'espaces de distribution intérieure comme les parties communes des immeubles, situés entre l'espace privé de l'appartement et l'espace public »<sup>[1]</sup>.

De tels espaces sont souvent considérés comme des lieux de passage ou de circulation. Malgré quelques tentatives de définition précise, la terminologie reste floue, non seulement sur le plan sémantique mais également sur le plan juridique, ce qui pose un problème, notamment par rapport à la propriété, à la responsabilité d'entretien de ces espaces. De ce fait, il reste assez difficile d'établir des frontières nettes entre ces espaces et les espaces publics ou privés. D'aucun considère l'espace intermédiaire comme un prolongement du logis privé, d'autres estiment qu'il est une interface entre les sphères intime et sociale, incarnant par là même le rapport de l'habitant à son environnement public ; d'autres enfin, préfèrent lui attribuer une dominante publique. Le sens que prend cette notion a pu varier au fil de l'histoire, notamment avec les grandes réformes d'urbanisation de la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, et est donc fonction de l'idéologie, des champs disciplinaires invoqués<sup>[2]</sup>.

Du fait de cette indétermination, les espaces obéissants à cette définition sont nombreux : balcon, terrasse, véranda, garage, abri de jardin, jardin même, appentis pour ce qui s'apparente plus à un prolongement du logis ; couloir, hall d'entrée, cour intérieure, porche, galerie, patio, coursive, si l'on considère les espaces intermédiaires comme une interface privé/public, galerie couverte, patio, atrium, cour intérieure ou bien porche peuvent également être considérés comme étant à dominante publique si l'on considère ceux-ci comme étant à l'intérieur d'un bâtiment public, ou bien s'ils permettent de relier des rues par exemple.

Selon la façon dont on considère l'espace intermédiaire dans le bâtiment, celui-ci peut jouer un rôle de contrôle de l'intimité (dans le cas d'un logement) et/ou un contrôle du microclimat<sup>[3]</sup>. Un contrôle de l'intimité d'une part car, étant espace de transition, l'habitant ouvrant la porte de son logement ne donnera pas accès à sa vie intime à l'espace public directement, celle-ci n'étant visible que depuis l'espace intermédiaire, dont l'occupation est dictée par le résident du logement concerné. Un tel rôle n'est possible que lorsque l'on intègre à l'espace intermédiaire une dimension publique (soit un prolongement du logis privé, soit une interface entre les sphères intimes et sociales). Un contrôle du microclimat d'autre part car, par nature, il offre à l'occupant une connexion à l'espace extérieur, un besoin physiologique pour l'homme, tout en lui permettant de contrôler dans une certaine mesure le vent ou la température au sein de cet espace. En effet, par sa configuration géométrique, les matériaux qui le composent, son orientation, et son usage, l'espace intermédiaire est capable de réguler la chaleur en été, d'optimiser le rayonnement solaire incident l'hiver, de bloquer les vents, autant d'éléments qui jouent sur le microclimat et le confort thermique de l'occupant.

Nous souhaitons ici nous attarder sur les espaces intermédiaires présentant un potentiel de régulateur de chaleur en période estivale et affichant une accessibilité au public, ce qui nous permettra d'avoir accès facilement à ceux-ci, et de pouvoir caractériser le microclimat et le confort thermique dans de tels lieux. Nous présenterons ci-après les espaces qui peuvent avoir un impact sur le microclimat et le confort thermique.

### 1.1.2. Typologie

L'espace intermédiaire influe sur le microclimat et la sensation de confort thermique pour plusieurs raisons. D'abord, il peut agir sur les apports solaires, modifiant de ce fait la température ressentie. De plus, il peut agir sur l'humidité de l'air, laquelle joue également un rôle sur le confort de l'occupant de l'espace. Enfin, il a un impact sur les mouvements convectifs de l'air, ce qui présente ici aussi des conséquences sur le confort de l'occupant. L'espace intermédiaire joue en quelques sortes un rôle de régulateur thermique par rapport à l'air extérieur, par sa configuration géométrique, son orientation vis-à-vis de la course du Soleil, les matériaux qui le composent, la présence de végétation ou de bassin d'eau.

#### 1.1.2.1. L'atrium

A l'origine, l'atrium était un élément de la *domus* romaine, une cour intérieure entourée des corps de logement. Il est par la suite devenu la pièce centrale de la maison, lieu de réception des hôtes, précédant le cœur du logis, plus intime. Il présente une ouverture dans le toit au droit de laquelle on trouve un bassin permettant de recueillir les eaux de pluie. De nos jours, les atria se situent pour beaucoup dans les établissements tertiaires recevant du public, ou bien dans certains bâtiments entièrement publics. Ils peuvent être conçus de la même façon que les atria traditionnels de la Rome classique – une pièce présentant une ouverture au milieu du toit – mais le plus souvent, on observe soit une fermeture du bâtiment autour de l'espace délimité par l'ouverture dans le toit – l'atrium ainsi formé s'apparentant à une cour intérieure dans laquelle on ne peut circuler – ou bien une fermeture vitrée au niveau de l'ouverture initialement percée au plafond.



Figure 1: de gauche à droite, atrium romain classique, atrium avec toit vitrée au niveau de l'ouverture et atrium isolé de l'intérieur du bâtiment

L'atrium agit sur le confort thermique sur deux volets. Par le matériau dont il est fait, il constitue un espace tampon entre l'air extérieur et l'intérieur du bâtiment. En effet, un toit vitré va induire un effet de serre, réchauffant ainsi la température de l'air intérieure, ce qui est bénéfique pour les périodes hivernales. A l'inverse, un atrium isolé de l'intérieur par des murs recevra moins de rayonnement solaire, et présentera d'autant plus d'ombrage qu'il est profond, ce qui limitera le phénomène de surchauffe. D'autre part, la configuration géométrique de l'atrium générera des mouvements d'air qui engendrera des échanges thermiques convectifs, lesquels auront également un

impact sur le confort thermique et le microclimat au sein de cet espace. En fonction de l'orientation, des matériaux utilisés, et de la configuration géométrique notamment, les effets de cet espace sur le microclimat varieront<sup>[4]</sup>.

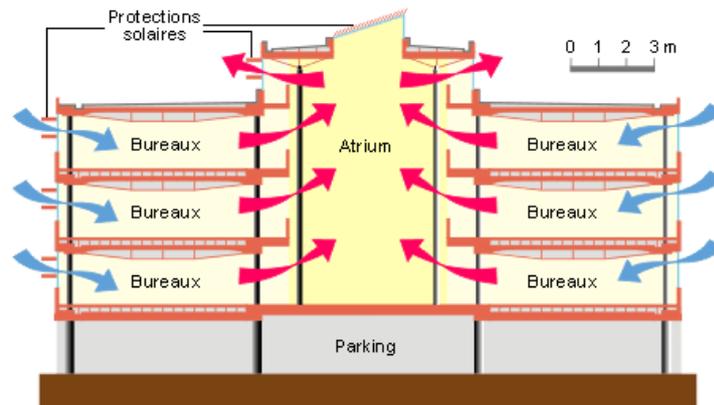


Figure 2 : Refroidissement par convection naturelle en été dans un atrium

### 1.1.2.2. Le porche

Le porche se caractérise comme un prolongement bas du bâtiment, se trouvant devant l'entrée d'une construction placé devant la façade. Il réalise la fonction d'interface entre l'usage intérieur du bâtiment et le milieu extérieur, comme un hall d'entrée ou un vestibule extérieur à la construction. Il peut également faire référence dans certaines régions (Cévennes, Provence) à une ouverture ou un passage entre un milieu extérieur public et une cour intérieure ou un sous-sol, jouant là aussi son rôle d'interface entre sphère publique et privée.

Cet élément d'architecture est également très présent dans les édifices religieux (églises et mosquées notamment) où il servait historiquement de lieu d'échange pour la population, de refuge pour les mendiants, de tribunal de plein air quand le magistrat rendait la justice, mais incarnait surtout l'antichambre de la divinité vénérée.



Figure 3 : A gauche, un porche en corps bas du bâtiment, à droite un porche traditionnel de l'architecture cévenole

De même que pour l'atrium, l'espace constitué par le porche va bénéficier d'un microclimat particulier et générer un certain confort thermique pour l'occupant, surtout en période estivale – d'où son utilisation dans les régions méridionales en France et dans les pays chauds et arides dans le cas des mosquées. En effet, par nature, il offre un abri à l'occupant, le protégeant ainsi de la chaleur apportée par le rayonnement solaire par l'importante part d'ombrage qu'il offre.



Figure 4 : Porches dans l'architecture religieuse ; à gauche sur le parvis d'une église, à droite l'« iwan » d'une mosquée iranienne

D'autre part, ces espaces sont généralement constitués par d'épaisses parois en pierre (type de pierre variable en fonction de la géologie régionale), ce qui apporte une inertie thermique considérable, et permet de mieux conserver la fraîcheur lors de périodes de surchauffe. Cet effet est d'autant plus important dans les passages vers les sous-sols ou cours intérieures des maisons traditionnelles de certaines régions du sud de la France, dans les Cévennes notamment, puisque ceux-ci sont très exigus et l'ouverture vers l'extérieur est étroite.

### 1.1.2.3. La cour intérieure – Le patio

En architecture, la cour intérieure se définit comme étant un espace découvert, ceint de murs ou de corps de bâtiment, constituant le prolongement d'une habitation ou d'un autre type de bâtiment. Si l'on se place à une échelle plus large, elle peut également désigner une place ceinte par des immeubles. Cet élément d'architecture était à l'origine un point central dans le logis, puisque l'ensemble de la vie et donc des pièces au sein de celui-ci s'organisait autour de cette cour. On retrouve cet espace intermédiaire de nombreuses cultures: romaine (au sein de la *domus*), sur tout le pourtour de la mer Méditerranée, ce qui comprend les civilisations musulmanes, maghrébines, byzantines notamment. On la retrouve également dans des pays chauds humides, notamment en Inde, et en Asie du Sud-Est.



Figure 5 : De gauche à droite, cour intérieure d'un immeuble parisien, patio du palais de l'Alhambra, cour intérieure d'un campus universitaire

Aujourd'hui, cet élément est présent partout dans le monde, que ce soit au sein d'un logement privé, une partie commune de copropriété (cour intérieure d'immeuble), un espace de repos dans un bâtiment de bureaux ou recevant du public, ou bien même une place publique. La cour intérieure est en général composée de dalles pavées, mais peut présenter des sols naturels. Elle peut de plus être pourvue de végétation plus ou moins luxuriante, et de bassin d'eau ou de fontaines, ce qui aura une influence sur le microclimat dans cet espace. Elle peut parfois être entourée d'une promenade cloîtrée, offrant un espace confortable de type galerie semi-ouverte.

La cour intérieure est un élément d'architecture qui offre également un potentiel de confort thermique intéressant. En effet, en fonction de sa configuration géométrique (forme, hauteur, largeur, longueur, périmètre), de son orientation vis-à-vis de la course du Soleil, ainsi que des matériaux utilisés dans les corps de bâtiment la ceignant ou bien des éventuels bassins d'eau et végétations la composant, la cour intérieure est capable d'apporter une sensation de fraîcheur lors de périodes de canicules, ou à l'inverse, une sensation de chaleur lors de périodes de grands froids.

#### 1.1.2.4. La traboule

Un autre espace particulier qui peut être caractérisé d'espace intermédiaire semi-ouvert est la traboule (du latin *trans ambulare* qui signifie « se promener à travers »). Ces espaces sont très présents dans certaines villes françaises, et notamment à Lyon qui en compte plusieurs centaines très bien conservées. En lien avec le développement historique et la topographie de la ville, elles ont un rôle bien particulier dans chacun des quartiers de la ville. Historiquement, le cœur de la cité lyonnaise se situe dans l'actuel quartier du Vieux-Lyon, cerné d'une part par la colline de Fourvière, et d'autre part par la Saône, d'où un manque d'espace pour étendre la ville. La traboule permet de répondre à cette problématique en créant un passage couvert permettant d'aligner des bâtiments résidentiels l'un derrière l'autre, afin d'éviter que tous ne soient desservis par une rue. Dans le quartier de Croix-Rousse (et plus tard sur la Presqu'île), la fonctionnalité, mais aussi l'architecture sont différentes : lors de l'implantation et surtout du développement du travail de la soie du XVII<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècle – soit plusieurs centaines d'années après la construction de celles du Vieux-Lyon actuel – elles permettaient de transporter plus facilement les matières premières et finies de cette industrie depuis la colline de Croix-Rousse vers les ports de commerce fluviaux (sur le Rhône et la Saône).

Dans les deux cas, cet espace se présente de plusieurs façons différentes :

- La traboule directe, où dès l'entrée on entrevoit la sortie vers une autre rue.
- La traboule rayonnante où, au milieu du passage couvert, on aboutit sur une cour intérieure permettant d'accéder à plusieurs immeubles résidentiels.
- La traboule à détours, dans laquelle le passage est sinueux, et ne permettant pas de voir la sortie dès l'entrée dans le passage.

Selon l'endroit et l'usage historique de ces traboules, elles peuvent aboutir à une impasse – dans le Vieux-Lyon actuel, où l'on cherchait à optimiser l'espace – ou bien relier deux rues entre elles – dans le quartier de Croix-Rousse, où l'on cherche le chemin le plus court pour transporter les marchandises. Lorsque la traboule comporte une cour intérieure, on peut constater sur les étages supérieurs de

celles-ci des passages entre immeubles se présentant sous la forme d'une galerie semi-ouverte (fermée sur un côté par un mur, ouvert de l'autre). Cet espace bien spécifique peut se voir comme un assemblage de plusieurs autres espaces intermédiaires, notamment une cour intérieure à la suite d'une galerie couverte.



Figure 6 : A droite traboule du quartier de Croix-Rousse, à gauche, traboule du vieux Lyon

Outre son usage historique et aujourd'hui son attrait touristique, la traboule présente également un intérêt du point de vue climatique puisque son agencement engendre un microclimat bien particulier. En effet, son architecture se compose d'un couloir couvert débouchant sur une cour intérieure profonde ou d'une galerie couverte selon le quartier dans lequel on se situe au sein de Lyon, et va donc regrouper certaines des caractéristiques des espaces de type « cour intérieure » et « galerie couverte ». De ce fait, la traboule sera particulièrement confortable en période estivale car va offrir beaucoup d'ombrage et donc limiter les apports solaires grâce à un facteur de jour faible. Lorsqu'elle comporte des galeries semi-ouvertes sur les passages des étages supérieurs entre immeubles, la cour intérieure offrira un ombrage supplémentaire à l'utilisateur de cet espace, d'où un confort plus important.

#### 1.1.2.5. La galerie

Le dernier espace intermédiaire à dominante publique que nous pouvons relever est la galerie. Celle-ci se caractérise par ses proportions géométriques particulières, étant beaucoup plus longue que large. Elle pourrait s'apparenter à un couloir de dimensions exceptionnelles, dont l'architecture est particulière. Son usage ainsi que son implantation au sein du bâtiment sont variables : lieu de séjour ou de circulation, entièrement isolée de l'extérieur ou semi-ouverte, pièce centrale du bâtiment ou simple espace de connexion entre deux pièces.

A l'origine, cet espace est utilisé dans les édifices religieux, reliant le parvis à l'autel, et était donc une pièce centrale intérieure mais également de transition entre deux lieux importants de l'église. Les galeries étaient également largement utilisées dans les mosquées, plus de type semi-ouvert sur une cour dont on peut voir aujourd'hui de nombreux vestiges (au Maghreb, en Andalousie par exemple). On a vu se développer la galerie couverte dans des logis privés notamment dans les demeures seigneuriales et royales, utilisée alors comme salle d'apparat. Son utilisation s'est également diversifiée en lieu de promenade extérieure, la galerie étant alors semi-ouverte et ceignant généralement une cour intérieure (abbayes, cloîtres par exemple).

Enfin, on a pu voir se développer ce type d'espace intermédiaire à une échelle plus large que le bâtiment, formant un lieu de vie incontournable de la ville, parfois le centre marchand et d'activités de celle-ci. C'est notamment le cas des halles, souvent semi-ouvertes que l'on retrouvait historiquement dans les villes importantes, et que l'on peut aujourd'hui encore retrouver dans des

villes comme Florence (galerie des Offices), Venise (galerie couverte ceignant la place Saint-Marc) par exemple.



Figure 7 : A l'échelle du quartier, à gauche une galerie à Venise, à droite la galerie des Offices à Florence

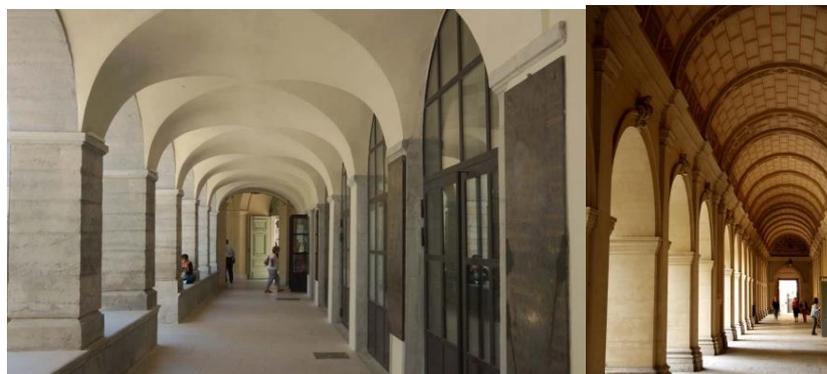


Figure 8 : A l'échelle du bâtiment, à gauche le cloître du Grand Hôtel-Dieu de Lyon, à droite le cloître du musée des Beaux-Arts de Lyon

D'un point de vue du confort thermique, nombre de galeries semblent présenter un confort intéressant en période estivale notamment, on l'observe et le comprend de façon empirique en analysant l'attitude des occupants de cet espace et en s'y rendant soi-même. En effet, la galerie offre un ombrage important à l'occupant, bloquant ainsi une part importante des apports de chaleur du Soleil. De plus, sa caractéristique géométrique principale – grande longueur par rapport à sa largeur – est une configuration propice à la circulation d'air, et pourrait donc engendrer un refroidissement par convection, jouant également un rôle de régulateur thermique en cas de fortes canicules. Enfin, de même que pour les porches traditionnels dans les régions méridionales, les galeries couvertes traditionnelles sont réalisées avec des matériaux présentant une importante inertie thermique, laquelle pourrait permettre de conserver de façon optimale la fraîcheur, un atout supplémentaire dans le rôle de régulateur thermique.

### 1.1.3. Tableau synthétique

Ce travail de typologie nous permet de déterminer des paramètres permettant de classer les espaces intermédiaires selon leurs caractéristiques. Ainsi, chacun de ces espaces peut se caractériser par son utilisation, le type de bâtiment ou de lieu dans lequel il est employé, sur quel paramètre microclimatique il peut agir, ainsi que par son lieu de naissance. Ces caractéristiques sont résumées

dans le tableau suivant, tableau qui permet de bien différencier chaque espace intermédiaire préalablement définis et qui permet d'avoir un panorama d'espaces représentatifs de l'espace intermédiaire à dominante publique.

<b>Utilisation des espaces</b>	Espace tourné vers l'intérieur	Espace de transition	Espace extérieur	
<b>Localisation</b>	Bâtiments de bureaux	Edifices publics	Logement individuel/collectif	
<b>Action sur le microclimat</b>	Humidité de l'air	Mouvements convectifs	Ombrage	
<b>Lieu d'origine et de développement</b>	Région Lyonnaise – Italie du Nord	Europe occidentale	Provence – Cévennes	Moyen-Orient - Maghreb
<b>Fréquence d'occurrence</b>	Typique d'une région	Répandu sur une partie de continent	Présent partout dans le monde	

Tableau 1 : Classification des espaces intermédiaires

La fréquence d'occurrence, largement reliée au lieu d'apparition et au développement historique, ainsi qu'au contexte climatique et à son usage, est ainsi très variable en fonction de l'espace intermédiaire considéré. Dans l'optique de proposer des espaces intermédiaires accessibles à tous et confortables d'un point de vue thermique en période de canicule, il paraît pertinent de s'intéresser particulièrement aux espaces largement répandus à travers le monde et largement accessibles au public, mais également de tenir compte de la faisabilité d'une étude microclimatique sur un tel espace, ce qui n'est pas le cas de tous les espaces.

#### 1.1.4. Espaces retenus

Parmi les espaces intermédiaires exposés précédemment, on voit apparaître une nette différence d'occurrence entre ceux-ci à travers le monde. De plus, certains de ces espaces ne sont finalement que peu présent dans l'environnement extérieur, se situant plus à l'intérieur même d'un bâtiment, ou bien constituant la transition entre un bâtiment et la voie publique. Enfin, certains de ces espaces regroupent les caractéristiques de plusieurs autres, ce qui ne nous paraît pas optimal comme cas d'étude. De ce fait, tous ne présentent pas la même accessibilité au public, tous n'occupent pas autant de place dans la voie publique, une étude sur ceux-ci n'aurait par conséquent qu'un effet limité si l'on souhaite proposer des espaces confortables en été pour les occupants.

Les espaces qui semblent correspondre aux caractéristiques précédentes serait l'atrium, le porche, ainsi que la traboule. En effet, l'atrium étant situé majoritairement dans des bâtiments tertiaires recevant du public, il n'est pas situé sur la voie publique et n'est donc que peu utilisé par la population extérieure audit bâtiment tertiaire. De plus, beaucoup d'atria sont constitué d'un plafond vitré, ce qui n'est pas recherché pour le confort d'été. Le porche, quant à lui, est bien spécifique de certaines régions ou de certains bâtiments (cf partie 1.1.2.2.), et est donc peu répandu dans le monde relativement aux autres. Il est généralement situé à l'interface de grandes bastides privées et de l'extérieur, ce qui en fait là également un espace peu accessible au public. Enfin, si la traboule est très accessible au public, elle est très spécifique d'une région (cf 1.1.2.4.) et regroupe des caractéristiques de la cour intérieure et de la galerie couverte. Nous avons ici aussi un espace qui n'est pas très répandu à travers le monde.

A l'inverse, les espaces de type cour intérieure ou patio, ainsi que galerie sont bien plus répandus dans le monde : la cour intérieure ou le patio, ainsi que la galerie dont elle est souvent ceinte, se sont développées sur tout le pourtour méditerranéen d'abord grâce à l'influence romaine (sur le modèle de la *domus* traditionnelle), puis grâce à l'influence musulmane au Maghreb, en Europe Occidentale du Sud, et bien sûr dans toute la péninsule arabique (la riad traditionnelle s'organise autour de ces espaces) ainsi qu'à l'influence catholique en Europe du Nord (les abbayes notamment s'organisent autour de cours cloîtrées). Par la suite, la Renaissance a également vu les cours ainsi que les galeries se développer largement et dépasser l'échelle du bâtiment. D'importantes places publiques sont dorénavant conçues sur des modèles de cours ceintes de galeries, souvent vestiges d'anciens édifices religieux. La cour intérieure ceinte d'une galerie a été et est toujours largement utilisée dans des régions au climat chaud (aride ou humide) en Asie du Sud-Est et de l'Est notamment (Chine, péninsule indochinoise, Indonésie).

Le but de cette étude étant de contribuer à une offre d'espaces extérieurs accessibles au plus grand nombre et confortables en période estivale, les éléments présentés ci-dessus invitent à se concentrer particulièrement aux espaces offrant la meilleure accessibilité au public. Par la suite, nous nous concentrerons donc sur les espaces « cour intérieure – patio » et « galerie ».

## **1.2. Analyse bibliographique**

Le travail de bibliographie mené durant les premiers temps de l'étude permet de comprendre quels paramètres ont déjà été étudiés dans la littérature et leur impact sur le microclimat et sur quels espaces ont été menés ces travaux. Il s'agit également de comprendre si les travaux déjà réalisés traitent de la caractérisation par des grandeurs physiques du microclimat ou bien si l'accent a été mis sur le ressenti des occupants de tels espaces au moyen d'enquêtes et de sondages, puis par des analyses statistiques. Enfin, le but global de l'étude étant de proposer des espaces extérieurs confortables en période estivale aujourd'hui aussi bien que dans le futur, l'analyse bibliographique permet de comprendre quels travaux ont été menés dans des pays possédant un climat qui sera celui de la France d'ici 2050 ou 2100, et ainsi de pouvoir s'en inspirer afin de permettre à la population de s'adapter au réchauffement climatique en continuant de vivre à l'extérieur en été.

Les travaux déjà réalisés l'ont été pour la quasi-totalité sur des cours intérieures ou patios, ou sur des places publiques ayant des formes similaires à une cour intérieure. La caractérisation physique du microclimat dans l'espace extérieur est réalisée selon trois axes principaux dans la littérature.

- L'impact des caractéristiques géométriques de l'espace extérieur (facteur interne).
- L'impact de la végétation et des bassins d'eau (facteur interne).
- L'impact du climat ainsi que l'orientation par rapport à la course du Soleil (facteur externe).

D'autres études viennent compléter cette caractérisation par un travail sur l'aspect physiologique et psychologique du confort, ainsi que sur la modification d'énergie consommée ou de gaz à effet de serre générés engendrée lorsque l'on fait varier un paramètre particulier de l'espace.

### **1.2.1. La caractérisation du microclimat**

Lorsque l'on cherche à contrôler ou modifier le microclimat au sein d'un espace ouvert, on souhaite agir sur plusieurs choses (Zamani Z. et al. 2018)<sup>[5]</sup> :

- La part d'ombrage, qui permet de contrôler les apports solaires incidents.
- L'humidité relative de l'air, qui peut être modifiée par l'ajout de différents éléments dans l'espace.
- Les mouvements d'air convectifs.

Ces trois volets peuvent être modifiés par la conception géométrique de la cour, par la végétation, par la présence de bassins d'eau, par les matériaux des parois, des sols, ainsi que par le climat local, l'orientation par rapport à la course du Soleil.

### 1.2.1.1. Les paramètres géométriques

Les paramètres géométriques de l'espace sont un facteur intrinsèque à sa conception, et vont influencer majoritairement sur la part d'ombrage qui règne sur celui-ci. Dans le cas d'un espace rectangulaire, ils se composent simplement de la largeur, de la longueur, de la hauteur et de la surface au sol, ainsi que des différentes combinaisons de rapports entre ces grandeurs.

63 espaces extérieurs rectangulaires de type atrium, cour intérieure et passage couvert ont fait l'objet de travaux à Singapour dans un climat chaud humide, afin de caractériser l'influence des paramètres géométriques sur le microclimat (J. Gamero-Salinas et al. 2021)<sup>[6]</sup>. Il résulte de cette étude que les espaces extérieurs de ce type ont tendance à agir comme un espace tampon, c'est-à-dire qui tend à homogénéiser la température entre l'intérieur d'un bâtiment et l'extérieur.

Plus précisément, des espaces de type cour intérieure rectangulaire de géométrie variable ont été testées dans des pays au climat chaud aride (Algérie, Irak, Iran) en été ainsi qu'en hiver afin d'analyser les conséquences sur le microclimat.

A Biskra en Algérie, à partir de 5 échantillons, il a été suggéré que les cours intérieures se comportaient comme un régulateur thermique aussi bien en été qu'en hiver (M.S. Guedouh et N. Zemmouri, 2017)<sup>[7]</sup>. De plus, l'impact ratio d'aspect, qui est le rapport entre la hauteur de la cour et sa largeur, a été mis en exergue, et la température au sein de la cour diminue avec l'augmentation de ce ratio. Ainsi, dans une recherche de confort en période estivale, il semble pertinent de concevoir des cours intérieures profondes étroites.

Une étude plus approfondie a été conduite à Bagdad en Irak, à partir d'un échantillon de 50 cours intérieures rectangulaires de géométries distinctes. Les paramètres étudiés sont le rapport largeur/longueur (R1), le ratio d'aspect (R2), le rapport périmètre/hauteur (R3) ainsi que le rapport entre la surface à l'air libre et la surface totale de la cour (R5), qui caractérise la partie couverte de la cour (O. Al-Hafitha et al. 2017)<sup>[8]</sup>. Ces paramètres sont illustrés sur la Figure 9. Des analyses statistiques ont été réalisées afin de relier l'influence relative de chacun de ces paramètres sur l'ombrage généré dans la cour intérieure. Les travaux ont mené à la conclusion que les cours intérieures apportent un certain confort en période estivale, confort optimisé lorsque le ratio d'aspect est plus important. Les autres paramètres montrent une influence bien moins importante par rapport à ce ratio.

A partir des mêmes paramètres géométriques principaux, un autre travail a été mené en Iran dans les villes de Kerman et Ispahan dans 6 cours différentes (F. Soflaei et al. 2016)<sup>[9]</sup>. Des régressions linéaires ont également été réalisées afin d'étudier l'influence relative des paramètres sur l'ombrage de la cour. Il ressort de cette étude des résultats cohérents avec les précédents : le ratio d'aspect a un impact bien

plus important sur le microclimat dans la cour, il est ainsi recommandé de concevoir des cours profondes et étroites pour le confort d'été.

### The internal factors

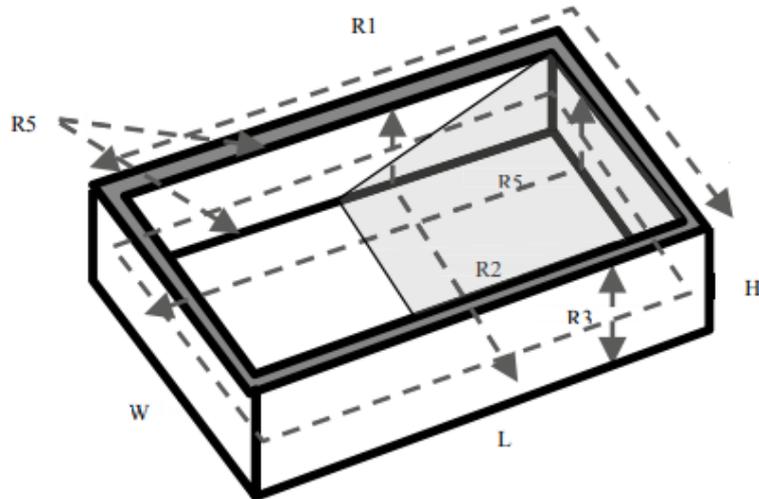


Figure 9 : Variables intrinsèques à la configuration géométrique affectant le niveau d'ombrage de la cour<sup>[9]</sup>

La forme de l'espace ouvert a également fait l'objet de plusieurs analyses dans la littérature. Une en particulier a étudié l'impact que pouvait avoir ce paramètre sur le microclimat au sein d'une cour intérieure. Les formes retenues sont une cour en pentagone, en hexagone, en heptagone, ainsi qu'en octogone (A.S. Muhaisen et M. B. Gadi, 2006)<sup>[10]</sup>. Ces géométries particulières ont de plus été testées avec différentes orientations par rapport au Soleil, ainsi qu'avec des ratios de périmètres/hauteurs (R1) différents. Au total, l'ombrage a été simulé au sein de 40 cours. Il résulte de cette étude que les différentes formes polygonales de cours n'influent que peu sur l'ombrage au sein de la cour, et que c'est ici encore la profondeur et l'étroitesse de la cour qui apporte la modification la plus significative.

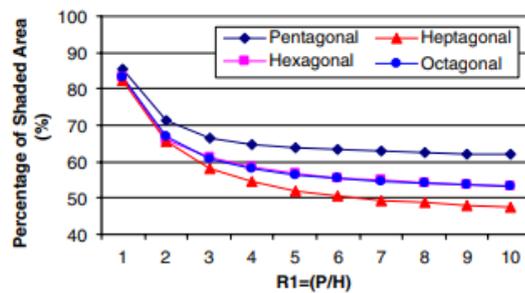


Figure 10 : Pourcentage des zones ombragées des murs en été<sup>[10]</sup>

### 1.2.1.2. La composition de l'espace extérieur

Des éléments particuliers qui composent l'espace extérieur comme la présence de végétation ou de bassins d'eau peuvent engendrer une modification locale du microclimat, ou bien encore les matériaux utilisés pour les parois de bâtiment au voisinage de l'espace.

L'influence de la végétation sur le microclimat local se manifeste par l'ombrage apporté par le feuillage, qui réfléchit une partie du rayonnement solaire au sommet de l'arbre et absorbe une autre partie pour la photosynthèse, ainsi que par l'évapotranspiration, comme illustré ci-dessous.

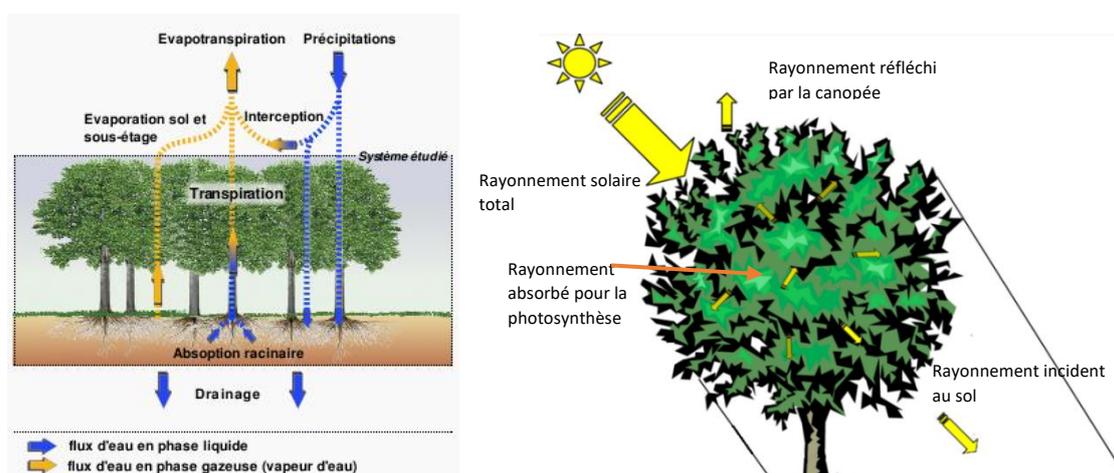


Figure 11 : Mécanismes des arbres impactant le microclimat local

Ainsi, une étude a été conduite à partir de mesures de terrain réalisées sur 77 sites partout dans le monde, afin d'analyser l'influence relative de ces paramètres sur le rafraîchissement local par une étude statistique (Y. Su et al. 2020)<sup>[11]</sup>. Celui-ci se mesure par la différence de températures entre l'air au voisinage de l'arbre, ici sous lui, et l'air loin de l'arbre. Il ressort de cette étude que le rafraîchissement imputable à la végétation dépend de la température de l'air extérieur, de la quantité d'eau évapotranspirée et de la surface de son feuillage. Plus précisément, au-delà de  $T_{\text{air}}=25,7^{\circ}\text{C}$ , ce paramètre correspond à 46% du refroidissement, au-delà d'une évapotranspiration de  $61 \text{ mm}\cdot\text{mois}^{-1}$ , ce paramètre compte pour 40% du refroidissement et enfin, au-delà de  $S_{\text{feuillage}}=35,2 \text{ ha}$ , ce paramètre contribue à 16% du refroidissement total. Il résulte de ce travail qu'une essence d'arbre avec une évapotranspiration importante et en période estivale aura un potentiel de refroidissement important.

En complément de cette étude, une autre a été menée permettant de calculer un rafraîchissement par évapotranspiration à partir de l'équation de Penman-Monteith, approuvée par l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture (P. Gkatsopoulos, 2017)<sup>[12]</sup>. Cette méthode prend en compte différentes caractéristiques intrinsèques à l'arbre et à son voisinage comme :

- La température moyenne journalière à 2 mètres de hauteur.
- La vitesse du vent à 2 mètres de hauteur.
- Le déficit de pression de vapeur saturante de l'air.
- Le flux solaire net intercepté par la canopée.
- La croissance de l'arbre.
- La hauteur de celui-ci, déterminée à partir de son âge.

Une base de données a été réalisée afin d'obtenir le refroidissement potentiel pour un grand nombre d'essences d'arbre. Ainsi, ces travaux permettent de prendre en compte précisément l'effet de la végétation dans des logiciels de simulation comme Envi-MET par exemple.

L'impact de l'ombrage apporté par la végétation sur le microclimat avoisinant a été étudié plus en profondeur dans des rues d'Ispahan en Iran, grâce à des simulations sur Envi-MET complétées par des mesures in situ (A. A. Venhari et al. 2019)<sup>[13]</sup>. Le facteur de jour, qui évalue l'ombrage d'un endroit précis, a été évalué en fonction de différents revêtements végétaux de sols, en partant de l'herbe jusqu'à un arbre adulte. Des corrélations statistiques ont ensuite été réalisées afin de comprendre l'influence relative du couvert végétal dans un espace extérieur. Les résultats rejoignent les précédents, puisqu'ils montrent qu'il est préférable d'implanter de grands arbres avec une surface de feuillage importante pour optimiser l'ombrage.

La présence de bassins d'eau dans une cour intérieure ainsi que l'utilisation de matériaux spécifiques dans la composition des parois influent également sur le microclimat car ils modifient respectivement l'humidité de l'air ainsi que les apports solaires absorbés par les parois. En effet, un bassin d'eau va voir sa couche limite supérieure subir une évaporation à cause du rayonnement solaire incident. Cette réaction est endothermique, c'est-à-dire qu'elle nécessite un apport d'énergie du milieu extérieur, ici l'air ambiant. Cette énergie va être prélevée de l'air sous forme de chaleur sensible, modifiant par la même la température de l'air, et convertie en chaleur latente, affectant l'humidité relative de l'air. L'enthalpie de celui-ci restant constante durant cette réaction, c'est bien la température ambiante qui s'en retrouvera diminuée, d'où une sensation de rafraîchissement. Ce processus isenthalpique est également celui qui intervient dans l'évapotranspiration de la végétation. Des matériaux avec un coefficient de réflexion élevé (albédo) qui composent une paroi emmagasineront moins de rayonnement solaire, et la part de réflexion sera importante, d'où une amélioration du microclimat au voisinage de ces parois.

Ces trois techniques (matériaux à albédo élevé, refroidissement par évaporation, et présence de végétation) ont été testées dans le quartier de la Part-Dieu à Lyon (B. Morille et M. Musy, 2017)<sup>[14]</sup>. Dans les conditions d'expérimentation, l'utilisation de ces méthodes en journée en période de canicule a engendré un rafraîchissement non négligeable au voisinage des zones d'étude, avec une chute de 8°C de la température de l'air grâce à l'ajout de végétation et d'eau et une chute de 2°C avec des matériaux à albédo plus élevé de 0,6 par rapport au scénario de référence.

### **1.2.1.3. L'influence de l'endroit et du moment étudié**

La caractérisation physique du microclimat peut être également impactée par les conditions temporelles ainsi que géographiques. En effet, le microclimat au sein d'un espace extérieur sera différent selon le moment de la journée, par exemple une différence entre le jour et la nuit, ou bien selon le lieu géographique, qui verra le climat changer et donc influencer sur les conditions au sein de l'espace ainsi que l'orientation de celui-ci par rapport à la course du Soleil.

Dans le cas des cours intérieures, plusieurs études ont montré que la configuration optimale des cours pouvait être différentes en fonction du climat, et même que le confort recherché pouvait être différent en fonction des régions. Ainsi, A. S. Muhaisen (2006)<sup>[15]</sup> a montré que pour les climats froids, situé aux latitudes extrêmes, on cherche à maximiser le confort thermique en hiver, c'est-à-dire à optimiser les apports de chaleur issu du rayonnement solaire. A l'inverse, dans les climats chauds sec ou humide, on

recherche plutôt à maximiser le confort en été au sein d'un espace extérieur, autrement dit de refroidir le milieu extérieur autant que faire se peut par la réduction du rayonnement solaire. Pour les latitudes extrêmes, le Soleil est plus bas dans le ciel qu'aux alentours de l'équateur terrestre à une période donnée de l'année, c'est pourquoi il ressort de cette étude que les hauteurs optimales des cours intérieures sont plus faibles pour les climats froids que pour les climats chauds.

Concernant le confort d'été, L. Martinelli et A. Matzarakis (2017)<sup>[16]</sup> se sont intéressés plus spécifiquement au ratio d'aspect optimal (hauteur/largeur) en fonction du climat. Cinq cours intérieures dans cinq villes italiennes chacune représentatives d'un climat spécifique ont fait l'objet de mesures. Par suite, des simulations numériques ont été réalisées en modifiant pour chaque cour le ratio d'aspect afin d'en trouver la configuration offrant le meilleur confort en été par rapport au climat local. Les climats présents dans les cours testées sont « continental » (tempéré et froid), « méditerranéen » (tempéré et chaud) et « subtropical ». Les résultats rejoignent ceux de l'étude précédente, et montrent que plus le climat est chaud, plus l'impact du ratio d'aspect est important sur le confort d'une cour intérieure, et plus on cherchera à concevoir des cours profondes et étroites. Cependant, à partir d'une valeur seuil de ratio d'aspect, l'augmentation de ce paramètre n'engendre plus guère de bénéfice.

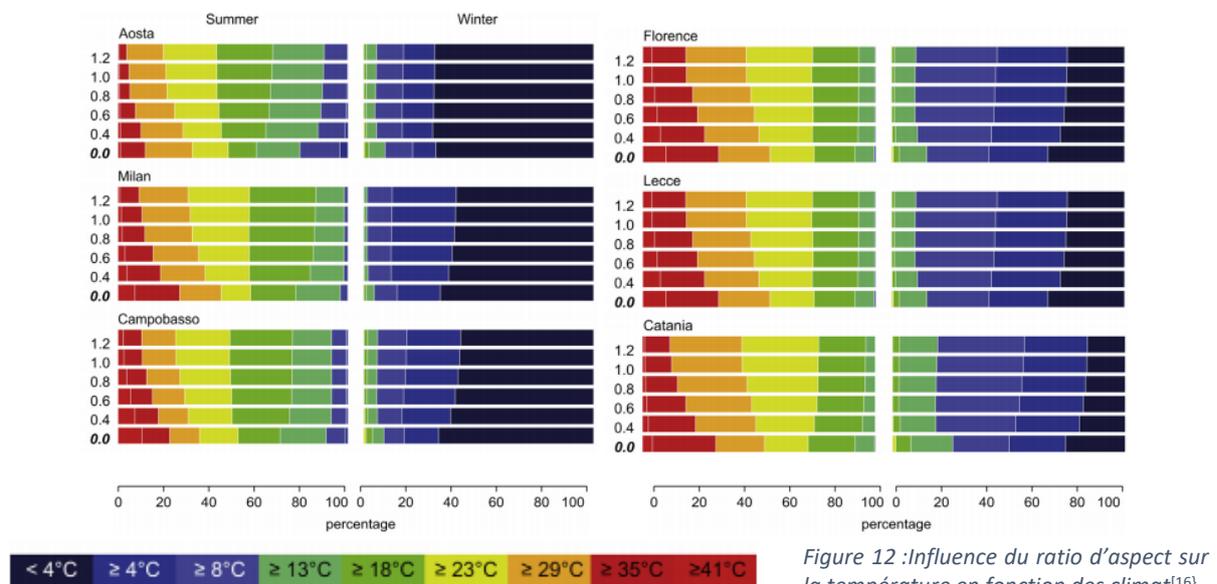


Figure 12 : Influence du ratio d'aspect sur la température en fonction des climats<sup>[16]</sup>

Enfin, l'impact du climat sur le confort d'été au sein d'une cour intérieure à différents moments de la journée a été analysé par C. Rivera-Gómez et al. (2019)<sup>[17]</sup>. Ici, ce sont 20 cours intérieures de géométries différentes et représentatives qui ont fait l'objet d'une expérimentation en Andalousie, dans 4 villes différentes (Cadix, Cordoue, Séville et Mérida). Des scénarii de réchauffement climatique ont également été simulés afin d'étudier plus profondément l'effet du climat local. Des analyses statistiques ont également été réalisées ici afin de mettre en exergue l'influence relative du moment de la journée ainsi que du climat de chaque ville. Quel que soit le lieu et le moment, cette étude révèle à partir de l'échantillon testé que la cour permet d'obtenir une température ambiante plus faible de 3°C par rapport à l'air libre à l'extérieur de cet espace, ce qui confirme le fait que la cour intérieure se comporte comme un régulateur thermique, résultat déjà avancé par les études citées plus haut. Du

point de vue du climat, cette étude confirme la précédente, car elle affirme que plus le climat serait chaud, plus l'impact du ratio d'aspect serait important sur le microclimat au sein de la cour intérieure. Il semblerait également selon ces travaux que la cour intérieure a un effet d'autant plus important sur le confort d'été qu'elle est située loin de la côte. Enfin, un résultat qui est mis en avant est l'impact de la configuration géométrique de la cour sur l'écart de température entre le jour et la nuit.

Un autre paramètre pouvant influencer le microclimat au sein de l'espace extérieur de type cour est l'orientation de son grand axe par rapport à la course du Soleil, dans le cas d'une cour rectangulaire.

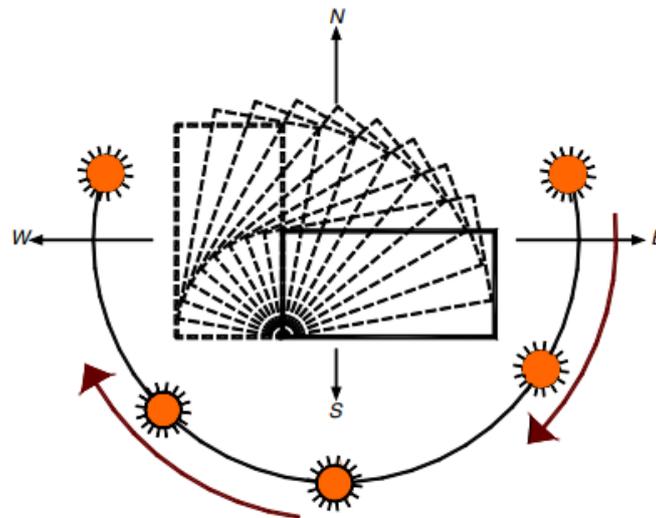


Figure 13 : Orientation de la cour intérieure par rapport à la course du Soleil

Parmi les études précédentes citées, certaines ont également analysé ce paramètre dans la caractérisation du microclimat de la cour intérieure. Elles ont été réalisées dans des climats chauds arides (Irak, Iran, Italie du sud, Andalousie)<sup>[8][9][13]</sup>, et présentent des résultats similaires qui montreraient que ce paramètre n'exerce qu'une faible influence comparée à d'autres, comme le ratio d'aspect par exemple.

### 1.2.2. Le volet psychologique

S'il est important de comprendre la physique qui régit les microclimats particuliers dans les espaces extérieurs de type cour intérieure ou galerie, il faut cependant valider ces descriptions par des observations réelles. C'est pourquoi il est également capital d'étudier le comportement des occupants sur différentes échelles de temps et d'espace. Les informations de ces comportements peuvent se faire par l'étude l'architecture au sein d'une région ainsi que par les observations directes de comportement.

#### 1.2.2.1. Une architecture vernaculaire adaptée

Lorsque l'on s'intéresse à l'architecture spécifique d'une région, ce que l'on appelle l'architecture vernaculaire, on peut se rendre compte que celle-ci est fortement interconnecté avec son

environnement. Dans les régions au climat chaud-aride ou chaud-humide, l'observation de l'architecture permet de déceler d'importantes corrélations entre celle-ci et le climat.

Des études menées dans différentes régions avec de tels climats ont confirmé ces observations aboutissant à ces corrélations supposées. Elles montrent que les habitants de telles régions ont empiriquement développé des espaces de type « patio », « porche », « galerie couverte » permettant de profiter d'un confort maximal lors de fortes chaleurs, confort que l'on est aujourd'hui en mesure de caractériser physiquement. Ces observations s'inscrivent dans l'histoire architecturale de toute une région, donc des échelles de temps et d'espace vaste.

C'est le cas dans le sultanat d'Oman, jouissant d'un climat chaud-aride sur la quasi-totalité de son territoire (H. Al-Hinai et al. 1993)<sup>[18]</sup>. L'architecture typique de cette région comprend beaucoup de cours intérieures avec de la végétation, des bassins d'eau, et beaucoup d'ombrage, afin de fournir de la fraîcheur.

Un autre exemple en Sardaigne met en exergue différentes caractéristiques architecturales en fonction de la région où l'on se situe (G. Desogus et al. 2016)<sup>[19]</sup>. Les travaux menés ici ne se cantonne pas au climat chaud-aride, la Sardaigne ayant également des climats plus humides, et plus tempérés. Cependant, des corrélations entre architecture vernaculaire et stratégies de construction d'une part et climat local d'autre part sont mises en avant : pour les 4 climats représentatifs de la région, on observe une architecture différente, adaptée aux conditions bioclimatiques. On observe entre autres des parois très épaisses et beaucoup de cours intérieures profondes dans les climats chauds, des conceptions permettant un potentiel de ventilation naturelle conséquent dans les régions plus humides.

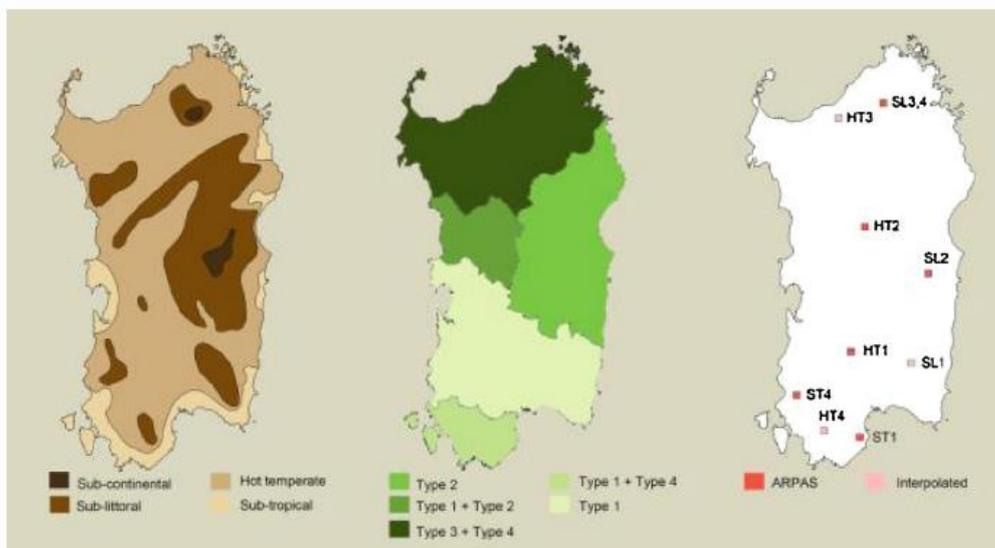


Figure 14 : De gauche à droite, la division de la Sardaigne en climats différents, la division en bâtiments vernaculaires différents et les échantillons des stations climatiques utilisées pour l'étude<sup>[19]</sup>

Des études similaires ont également été menées en Afrique sub-Saharienne, à Chypre, ou encore en Chine<sup>[20][21][22]</sup>.

### **1.2.2.2. L'étude des comportements des occupants**

A des échelles plus restreintes à la fois en temps et en espace, il est également possible d'observer les comportements des occupants d'un espace, extérieur dans le cas qui nous intéresse – comme des cours intérieures ou des patios –, sur un cycle de 24 heures par exemple et à l'échelle d'un seul bâtiment ou même d'un seul logement.

Parmi les travaux existant dans la littérature, H.A. Abdulkareem (2015)<sup>[23]</sup> s'est concentré sur le comportement des occupants d'un logement organisé autour d'une cour typique du Moyen-Orient, à Bagdad. A partir des prédictions physiques théoriques du microclimat au sein de la cour intérieure et dans le corps de logis, l'étude observe les habitudes de vie des habitants sur plusieurs cycles de 24 heures afin d'y déceler une concordance avec les prédictions physiques et questionne ces derniers afin de connaître leur niveau de confort. De ces travaux ressortent effectivement une concordance entre prédictions théoriques et observations comportementales : lorsque le confort thermique est optimal dans la cour pour une configuration géométrique donnée, les occupants des logements adjacents à la cour ont tendance à occuper cet espace.

### **1.2.3. Conséquences sur les performances énergétiques du bâtiment**

Outre le microclimat qui règne au sein des différents types d'espace extérieur, les paramètres géométriques, la composition, ainsi que la localisation ou le moment d'étude engendre des modifications sur les consommations d'énergie et sur les émissions de gaz à effet de serre d'un bâtiment. Cela est lié au potentiel de rafraîchissement naturel (ou de réchauffement dans le cas de l'hiver) offert par ces espaces au bâtiment en lui-même. Les études se sont concentrées sur l'influence des différents paramètres ainsi que des éléments qui composent la cour cités précédemment sur les performances énergétiques du bâtiment.

Ainsi, N. Fezzioui et al. (2012)<sup>[24]</sup> ont comparé les performances d'une maison à patio traditionnel à celles d'une maison moderne, avec le même taux d'occupation. Les simulations ont été réalisées sur TRNSYS, à partir de maisons sélectionnées dans 8 villes du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie et Lybie). Les travaux ont montré que l'intervalle de temps où les températures sont inconfortables est plus élevé dans les maisons modernes que dans les maisons à patio traditionnel. De plus, cette étude met en exergue le fait que les besoins en climatisation sont bien plus faibles dans la maison à patio que dans la maison moderne en période estivale alors qu'ils sont identiques le reste de l'année, ce qui semble aller dans le sens d'un confort plus important généré dans les patios traditionnels lors de canicules.

Des travaux détaillés pour analyser quel paramètre précisément permet d'améliorer ces performances énergétiques ont été menés. L'influence des proportions de la cour intérieure sur les besoins en énergie a été étudié en ce sens (A.S. Muhaisen et M.B. Gadi, 2006)<sup>[25]</sup>. Les cours étudiées sont toujours rectangulaires, et l'étude se focalise sur l'étrouitesse, caractérisée par le rapport largeur/longueur, R2, ainsi que sur la profondeur de celles-ci, caractérisée par le rapport périmètre au sol du bâtiment/hauteur, R1. Dans le contexte d'un réchauffement du climat et des étés de plus en plus rigoureux, le but recherché est de diminuer les besoins en climatisation des bâtiments. En ce sens, il a été montré que les configurations qui permettaient de minimiser ces besoins de climatisation étaient les cours étroites et profondes, avec une influence comparable.

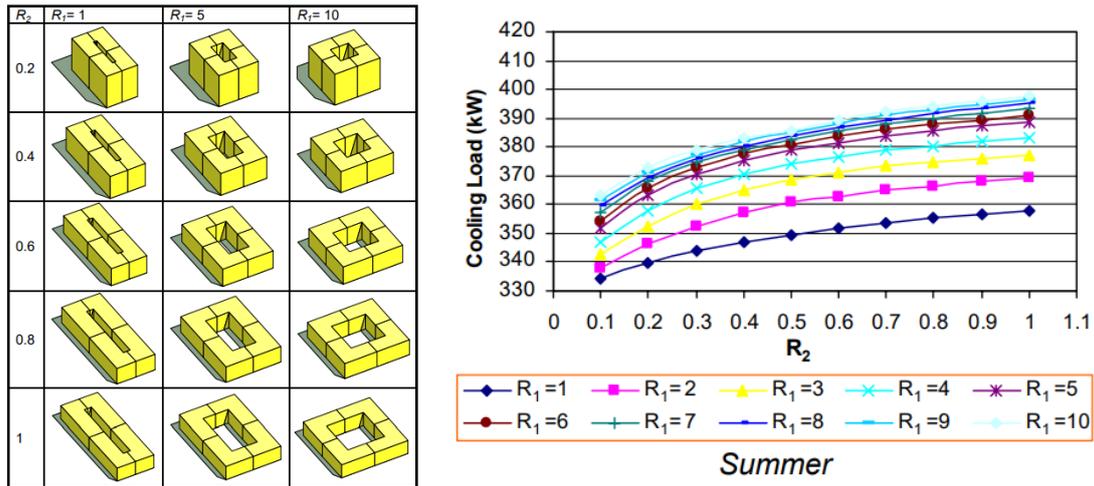


Figure 15 : A gauche les formes de cour rectangulaire étudiée<sup>[25]</sup>, à droite l'effet du changement de ratio d'aspect sur les besoins en refroidissement annuels

L'influence de la végétation d'un parc ou d'une cour intérieure sur les performances énergétiques des bâtiments avoisinants ont également été analysés dans deux études menées en Chine (F. Kong et al. 2016 et W. Lin et al. 2011)<sup>[26][27]</sup>. L'une modélise sur Envi-MET un campus universitaire de 25,56 hectares avec toutes les parties végétalisées (7,67 hectares), puis le même campus sans végétation dans un second scénario. Les résultats de la simulation, calibrée au préalable par des mesures sur site, montrent l'effet, met en exergue les îlots de chaleur urbains présents sur ce campus, et le rôle de régulateur de ceux-ci que joue la végétation dans le scénario où celle-ci est simulée. De ces résultats, l'étude propose un calcul de puissance de climatisation économisée grâce au rafraîchissement fourni par la végétation.

La seconde étude quant à elle, met l'accent sur les émissions de gaz à effet de serre économisées par la présence de végétation. Le modèle proposé est simplifié : des cylindres concentriques de 70 mètres de hauteur (Figure 16), dont les diamètres respectifs dépendent de chaque espace vert. De ceci découle une estimation de l'énergie thermique de refroidissement fournie par l'espace vert, qui serait comparable à l'énergie économisée normalement nécessaire au fonctionnement des climatiseurs. Enfin, des corrélations statistiques sont faites pour étudier l'influence relative des caractéristiques de l'espace vert (taille, indice d'ombrage) et sur les économies de CO<sub>2</sub> réalisées. Celles-ci augmentent significativement quand la taille de l'espace augmente. De plus, concernant les économies de CO<sub>2</sub> réalisées, pour une même surface d'espace vert, il est préférable de segmenter un quartier en plusieurs petits espaces verts qu'en un seul plus grand de surface équivalente, ce qui s'explique par de plus grandes zones de refroidissement induites par plus de parcs plus petits.

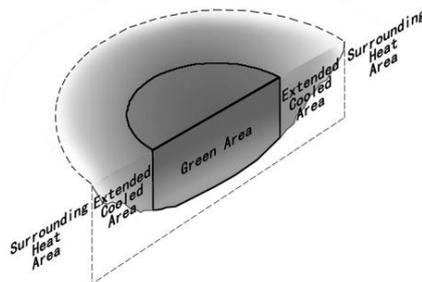


Figure 16 : Le modèle cylindrique pour le calcul d'absorption de chaleur des zones vertes<sup>[27]</sup>

## 1.3. Démarche retenue

### 1.3.1. La problématique

L'analyse bibliographique menée dans la partie précédente a permis de mettre en relief les travaux déjà menés sur les espaces qui nous intéressent, les connaissances manquantes ainsi que les points à approfondir. Les articles publiés traitent essentiellement des cours intérieures, de l'influence des différents paramètres géométriques, d'agencement, climato-géographique de celles-ci sur le microclimat au sein de cet espace. En complément, des travaux se focalisent davantage sur le ressenti psychologique et physiologique de l'occupant d'un tel espace ainsi que sur les conséquences qu'ont la modification de certains paramètres sur les bâtiments adjacents à la cour intérieure.

Il est cependant frappant de constater l'absence d'études traitant de l'espace de type galerie, que la galerie soit semi-ouverte et autour de la cour intérieure ou bien qu'elle soit plutôt de type tunnel, avec seulement des ouvertures à chaque extrémité du couloir. Ces lacunes dans la littérature incitent à tenter de caractériser physiquement le microclimat de la galerie, que l'on sait empiriquement confortable en période estivale. De la même façon que pour la cour intérieure, différents paramètres peuvent être étudiés afin d'analyser les conséquences sur le microclimat dans la galerie, comme les paramètres géométriques, les matériaux qui la composent, l'orientation par rapport au Soleil, le lieu géographique et donc le climat, ainsi que la présence ou non de végétation et de bassin d'eau à proximité.

Pour tenter de palier à ce manque de connaissances sur cet espace, nous réaliserons donc un modèle thermo-aéraulique en trois dimensions d'une galerie semi-ouverte de type « cloître » (Figure 17) – qui combine l'avantage d'être confortable en été et très accessible au public – pour étudier comment certains paramètres de la galerie influent sur les écoulements d'air au sein de celle-ci et sur les échanges thermiques par convection, afin de voir les conséquences sur le microclimat.



Figure 17 : Un exemple de galerie semi-ouverte de type « cloître » : l'abbaye royale de Fontevraud

### **1.3.2. Les objectifs**

Cette étude a vocation à contribuer à une offre large d'espaces extérieurs confortables en période de canicule, facilement accessibles (cf 1.1.4.). Les objectifs de cette étude sont multiples

- D'abord créer un modèle numérique de la galerie qui soit fidèle à la réalité, et qui sera vérifié par des mesures sur site. Ce modèle pourra être réutilisé par la suite pour des études plus approfondies de cet espace.
- Ensuite, le modèle sera exploité. Grâce aux simulations réalisées sur une période donnée, l'évolution de l'air au sein de la galerie pourra être caractérisée par les lignes de courants ainsi que sa température, ce qui permettra d'estimer physiquement si l'espace est confortable ou non en période d'été.
- Enfin, en testant plusieurs paramètres géométriques de la galerie, avec une simulation pour chaque grandeur du paramètre considéré, il sera possible de mettre en évidence (ou non) l'influence desdits paramètres et ainsi de trouver la conception géométrique de la galerie offrant un confort optimal pour l'occupant en période de canicule.

### **1.3.3. Les étapes du Travail de Fin d'Études**

Les premières semaines du travail ont été consacrées à la précision de l'espace à étudier et à l'analyse bibliographique. La précision du sujet s'est faite au moyen d'une typologie des espaces intermédiaires à dominante publique, ce qui a permis de se focaliser sur deux espaces particuliers pour répondre au mieux aux objectifs : la cour intérieure et la galerie. Cela a également facilité l'analyse bibliographique puisque les articles pertinents étaient bien moins nombreux. Afin de réaliser celle-ci, j'ai recherché dans les revues scientifiques les travaux déjà menés sur le microclimat de ces espaces dans les climats chauds, grâce aux mots-clés suivants : cour intérieure, patio, galerie semi-ouverte, comportement thermique, microclimat, proportions géométriques, morphologie, ratio d'aspect, orientation, apports solaires, ombrage, végétation, humidité, confort thermique, Moyen-Orient, Maghreb, bassin méditerranéen.

Cette phase a mis en évidence des sujets déjà largement traités par la sphère scientifique comme le microclimat d'une cour intérieure, par la modélisation de celle-ci uniquement, ou bien en l'insérant dans un contexte urbain grâce à Envi-MET notamment. Elle m'a également permis de voir un manque de connaissance sur le microclimat au sein de la galerie, car aucun modèle de cet espace n'a encore été développé. C'est pourquoi je me suis orienté vers la caractérisation physique de cet espace sur un logiciel spécialisé. Dans cette optique, il m'a fallu choisir, puis apprendre à utiliser ledit logiciel, ce qui a constitué la seconde étape du travail. Le logiciel retenu est Ansys-Fluent, qui utilise la modélisation aux différences finies, c'est-à-dire qu'il divise un domaine spatial en mailles au sein desquelles il résout de manière approchée les équations fortement non linéaires de la dynamique des fluides à intervalles de temps réguliers. Cela suppose une connaissance de celles-ci afin de comprendre où elles interviennent dans la construction puis la simulation du modèle.

Le modèle de galerie de référence a ensuite été construit pas à pas, en partant de sa géométrie, puis en définissant le maillage en tenant compte de la précision recherchée mais également du coût en

temps de simulation. Les paramètres de simulation ont ensuite été définis à partir d'hypothèses posées et justifiées. Ceci a constitué une troisième étape du travail.

Afin d'obtenir un modèle numérique fidèle à la réalité, il est nécessaire de réaliser des mesures sur un site adapté pour pouvoir par la suite implémenter sur le logiciel des conditions aux limites du domaine réelles, puis de confronter les résultats de la simulation aux mesures réalisées. Cette campagne de mesures a été la quatrième étape de l'étude.

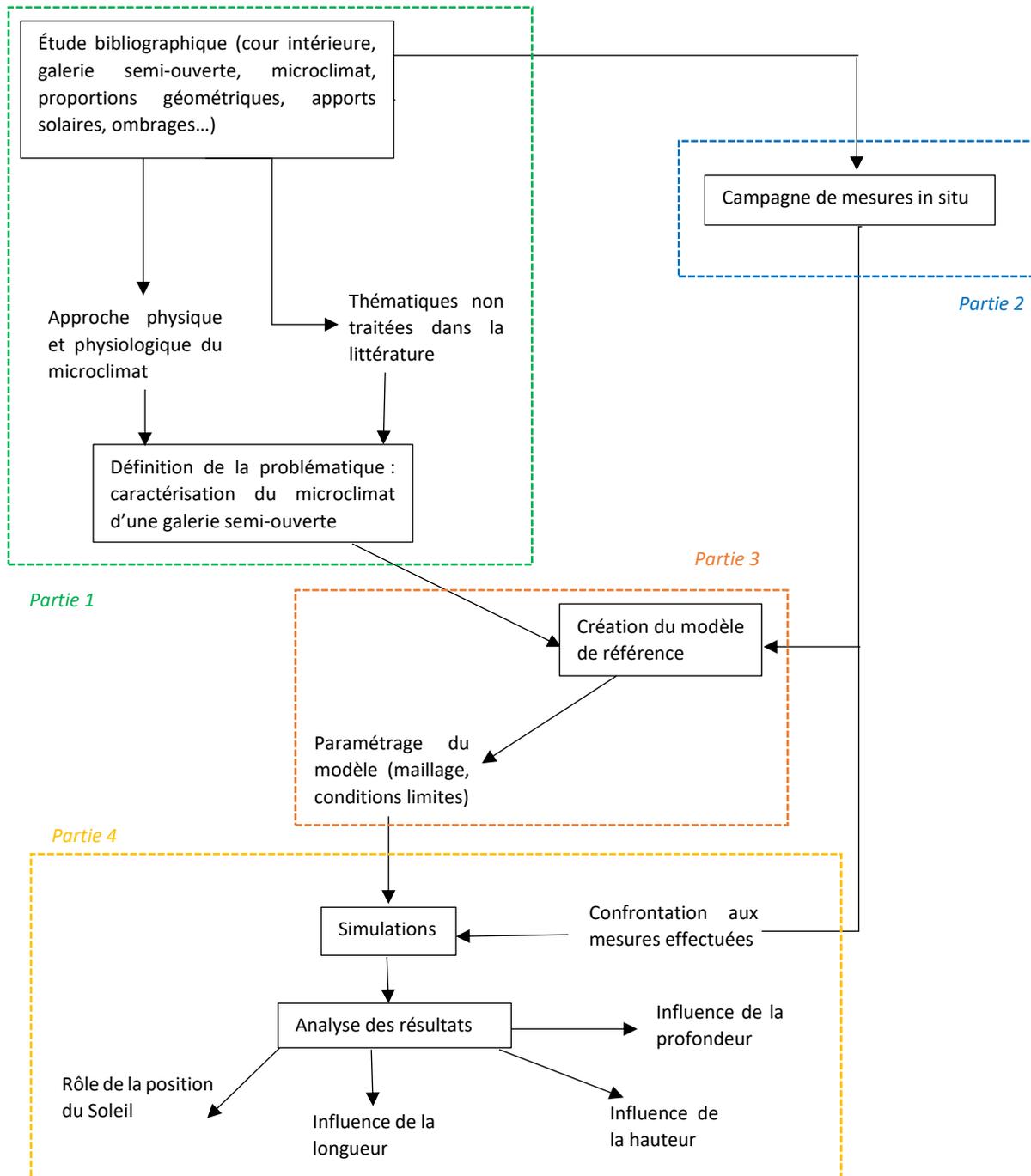


Diagramme 1 : Démarche de l'étude

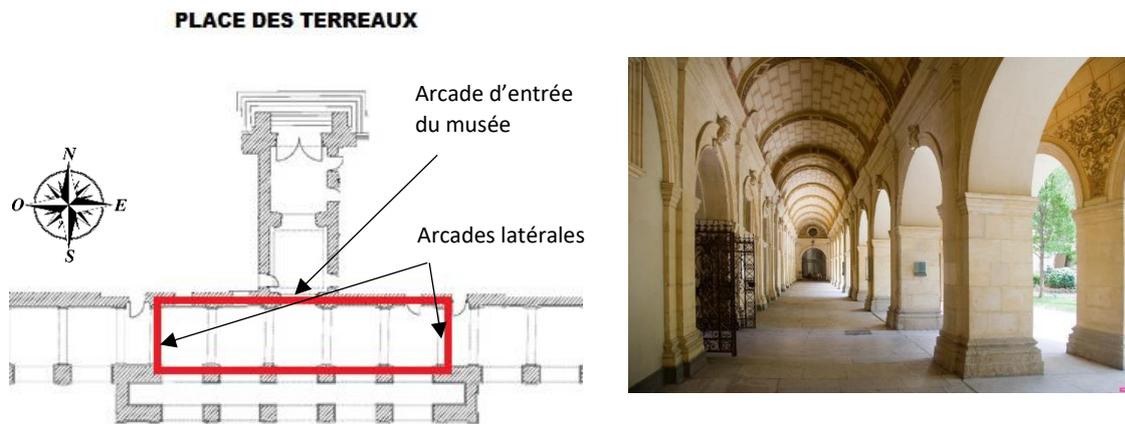
Enfin, une fois le modèle calibré sur la réalité, différentes pistes ont été explorées, notamment l'influence de divers paramètres géométriques de la galerie sur le microclimat généré au sein de celle-ci, en partant toujours du scénario de référence, qui est celui correspondant au site et aux conditions de mesures. Une simulation a ensuite été réalisée pour chaque modification du paramètre considéré. Cette dernière étape a pour but de trouver la meilleure configuration géométrique possible en vue d'un confort optimal en été.

## 2. Expérimentations in situ

### 2.1. Choix du site de mesures

#### 2.1.1. Description du site

La réalisation des mesures nécessite de choisir un site en accord avec les objectifs de l'étude : un lieu comportant bien évidemment une galerie semi-ouverte de type cloître, et qui présente une large accessibilité au public. Le site devait également présenter un potentiel de confort en période estival. De plus, ayant réalisé le travail à Lyon, il fallait un lieu dans cette ville pour le côté pratique. Pour toutes ces raisons, mon choix s'est porté sur la galerie du jardin du musée des Beaux-Arts de Lyon, orientée au Sud.



Ce site illustre par ailleurs certains aspects de la typologie des espaces intermédiaires (cf 1.1.2.). En effet, le corps de bâtiments du musée est organisé autour d'un jardin de type « cour intérieure », elle-même ceinte d'une galerie semi-ouverte. Le bâtiment abritant le musée est une ancienne abbaye (palais Saint-Pierre), un lieu religieux qui a participé à l'essor de ces espaces particuliers. Les matériaux employés pour la construction du bâtiment comportant la galerie sont des pierres calcaires.

Le site est situé en milieu urbain dense, un milieu qui génère des courants d'air particuliers, bien différents d'un milieu découvert. La morphologie urbaine locale va largement perturber les mouvements d'air, engendrant des vitesses d'air plus faibles que celles mesurées en station météo en terrain découvert, ce qui va limiter le potentiel de refroidissement par convection naturelle. Les lieux les plus propices à la circulation de l'air en milieu urbain dense sont les rues canyon, mais les vitesses d'air restent largement inférieures à  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  durant une journée ensoleillée d'été par exemple<sup>[28]</sup>. Ainsi, dans le jardin du musée des Beaux-Arts, les vitesses d'air sont extrêmement faibles.

Le contexte urbain dense dans lequel s'inscrit ce site semble également pertinent du point de vue des îlots de chaleur urbains. En effet, on constate au sein des villes des élévations locales de températures, conséquence de l'albédo très faible des sols, des activités industrielles ou du trafic routier à proximité, un phénomène qui semble en voie d'aggravation et que l'on ressent d'autant plus en période d'été.

Quand on sait que près de 70% de la population vivra en ville d'ici à 2050 (données de la banque mondiale), il semble d'autant plus intéressant d'offrir des espaces extérieurs ayant un fort potentiel de refroidissement et donc d'en comprendre les mécanismes.

## 2.1.2. Contexte climatique

### 2.1.2.1. Le climat actuel

La ville de Lyon se situe au nord de la région Auvergne-Rhône-Alpes, au milieu de plusieurs massifs montagneux : le Massif Central, les Alpes, les contreforts du Jura. Entre ces reliefs circulent deux cours d'eau importants, la Saône et le Rhône, la première se jetant dans le second à Lyon. Ces derniers ont creusé de vastes plaines orientées Nord-Sud, partant de Mâcon jusqu'au sud de la Drôme. Ce sont des éléments importants qui conditionnent le climat dans la ville de Lyon. L'influence océanique est stoppée à l'ouest par le Massif Central, l'influence méditerranéenne ne remonte que jusqu'à la moyenne vallée du Rhône (vers Valence), c'est donc une influence continentale à laquelle est majoritairement soumise la ville de Lyon<sup>[29]</sup>.

En conséquence le climat y est rigoureux, avec des hivers froids et des étés chauds, avec une moyenne de précipitation relativement faible. La dominante continentale du climat lyonnais impacte également la nature des précipitations, avec une proportion plus importante de chutes de neige que plus au Sud. Dans les zones de plaines de la région – c'est le cas de Lyon – c'est au printemps et en automne que l'essentiel des précipitations adviennent. La morphologie de la région engendre des déplacements de masses d'air importants le long de la Saône et du Rhône, selon un axe Nord-Sud, au carrefour desquels se trouve Lyon. Ainsi, la plaine de Lyon est balayée par des vents plus importants qu'ailleurs dans la région, mais cette tendance est largement atténuée lorsque l'on pénètre le milieu urbain dense (cf 2.1.1.).

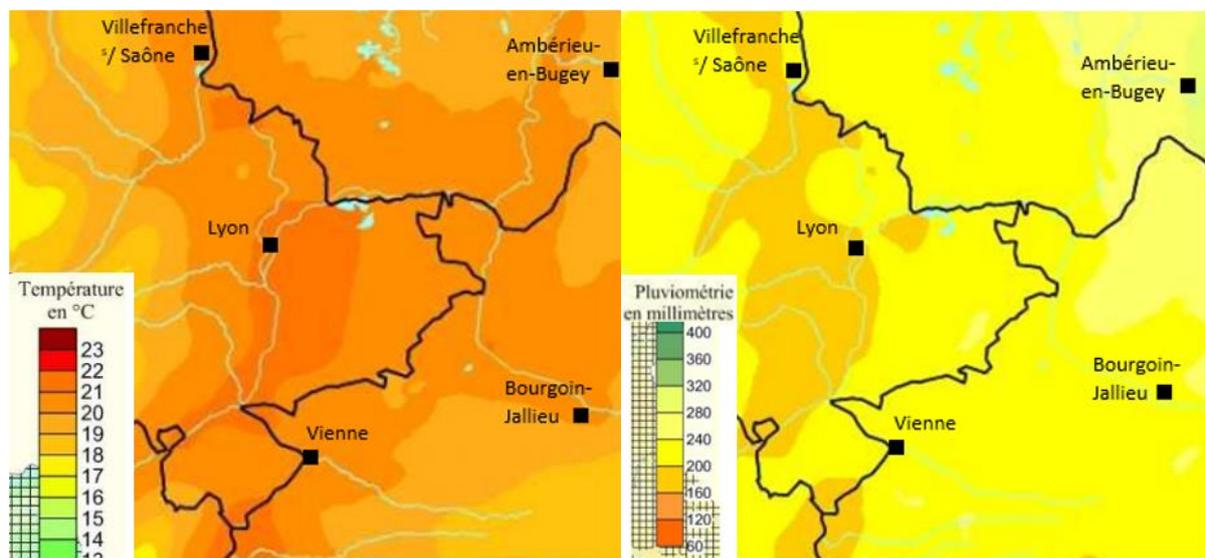


Figure 19 : Moyenne des températures et du cumul des précipitations dans la région Lyonnaise en été

Sur la base d'observation météorologiques de ces 50 dernières années, on peut caractériser l'été à Lyon comme étant une période chaude et sèche.

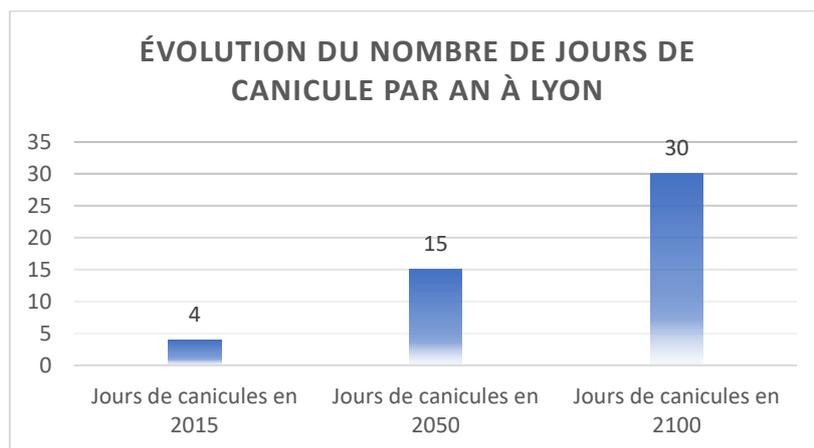
### 2.1.2.2. L'évolution du climat dans le futur

L'objectif de notre étude étant de proposer des outils de conception d'espaces extérieurs pour le futur, il semble pertinent de s'intéresser précisément à l'évolution du climat de la ville de Lyon, dans laquelle se situe le site de mesures – l'une des galeries du musée des Beaux-Arts. Dans le cadre de l'élaboration du Plan Climat Energie Territorial de la métropole de Lyon datant de 2015, un socle de connaissances locales relatives à l'adaptation au changement climatique a été rédigé<sup>[30]</sup>. Selon ce rapport, il est prévu, à partir des données de Météo France, que le climat de Lyon devienne celui de Madrid d'ici 2050, et celui d'Alger d'ici 2100, si les activités anthropiques actuelles restent inchangées.

Ces informations nous permettent de déterminer le nombre de jours de canicule par an à Lyon. Pour ce faire, il faut partir du seuil de déclenchement de l'alerte canicule dans le Rhône, défini par Météo France. Les conditions à réunir sont :

- La température minimale sur une journée ne chute pas en dessous de 20°C.
- La température maximale sur une journée dépasse les 34°C.

A partir de données météorologiques satellites (obtenues sur le portail « JRC Photovoltaic Geographical Information System), qui fournissent les données horaires d'une année météorologique typique déterminée sur une période de dix ans, il est possible de déterminer grâce à un tableur les jours qui correspondent à la définition précédente. Les résultats sont illustrés ci-dessous.



Graphique 1 : Estimation du nombre de jours de canicule annuel en 2015, 2050 et 2100

D'autres simulations plus précises ont été faites en fonction des différents scénarii d'évolution du climat définis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Une simulation réalisée par Météo France en utilisant son modèle ARPEGE-CLIMAT pour décrire l'évolution du climat de la région Auvergne-Rhône-Alpes avec une maille de 50 kilomètres de taille. Cela permet de visualiser l'évolution du nombre de jours de canicules dans la région, en se basant sur la même définition<sup>[31]</sup>. Les résultats sont illustrés ci-dessous.



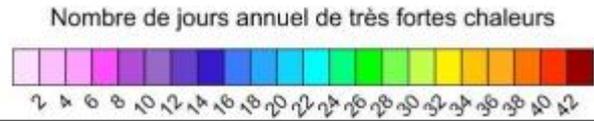
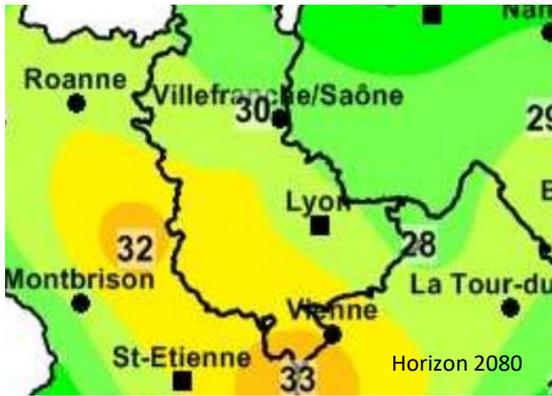
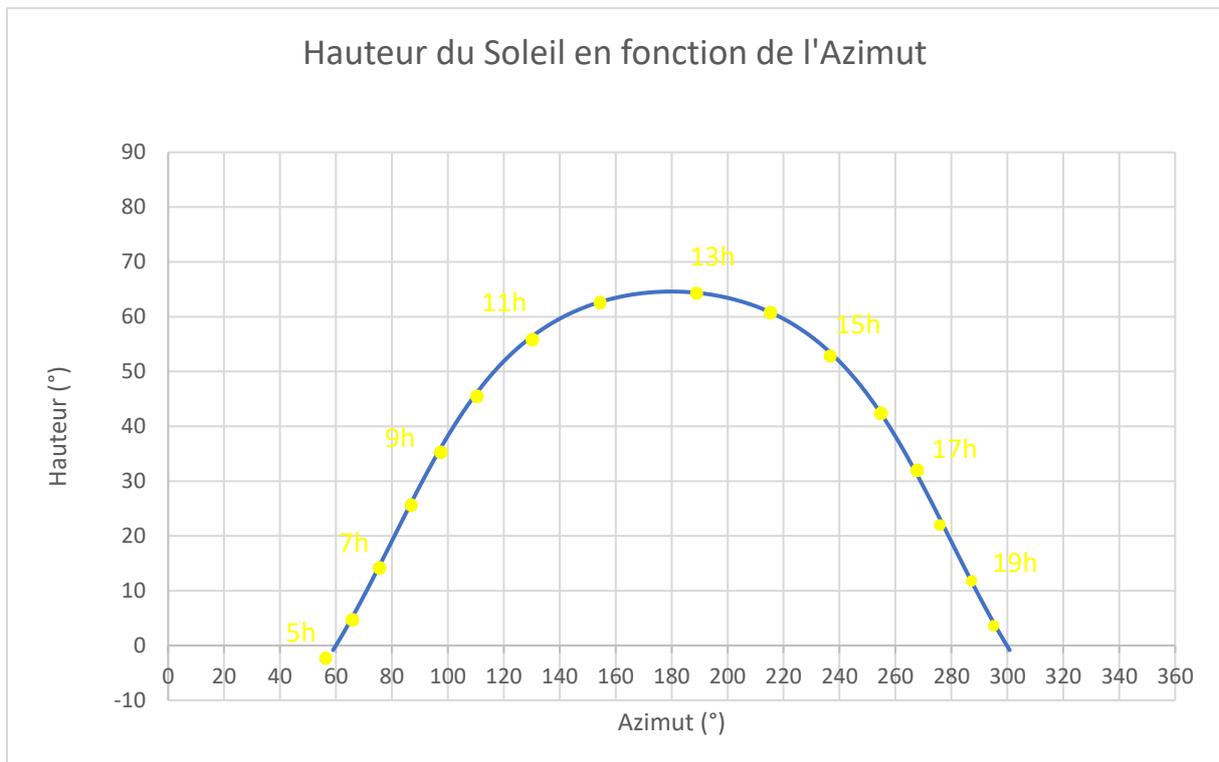


Figure 20 : Evolution du nombre de jours de canicule annuel selon Météo France. En haut à gauche, à l'horizon 2030, en haut à droite, à l'horizon 2050 et en bas à gauche, à l'horizon 2080.

Il faut donc s'attendre à une augmentation importante du nombre de jours de canicules dans l'avenir, un effet encore davantage ressenti en ville avec l'effet d'îlot de chaleur urbain mis en exergue précédemment (cf 2.1.1.). D'où la pertinence du lieu de mesure choisi, qui sera représentatif des zones habitées impactées au premier chef par le réchauffement climatique à venir, et qui apportera une réponse à ce dernier.

## 2.2. Choix du jour de mesures

La volonté de cette étude était d'étudier le microclimat de la galerie en période d'été. Compte tenu de l'évolution météorologique de l'année 2021, le jour retenu pour les mesures est le 21 juillet 2021, avec une moyenne de 16°C le matin et de 30°C l'après-midi à la station Lyon-Bron. La galerie étant orientée au sud, les heures de mesures ont été choisies en fonction de la course du Soleil dans le ciel, caractérisée par sa hauteur et son azimut, illustrés ci-dessous.



Graphique 2 : Hauteur du Soleil en fonction de son azimut le 21 juillet 2021

Etant données les contraintes d'ouvertures du musée, et afin de pouvoir étudier l'impact de la position du Soleil dans le ciel sur le microclimat généré dans la galerie (notamment les taches solaires engendrées), les heures retenues sont 10h, 12h45 et 15h30, afin d'avoir des positions représentatives respectivement du matin, de midi, et de l'après-midi. Afin que la position du Soleil ne varie pas trop au cours de la session de mesures, la durée de celles-ci est de 30 minutes pour chaque heure retenue. Les différentes grandeurs ont été relevées simultanément grâce à plusieurs appareils de même fonctionnalité.

### 2.3. Mesures au niveau d'une arcade extérieure

Comme exposé dans la partie 1.3.3., il nous faut, pour lancer les simulations sous Ansys-Fluent, définir des conditions aux limites du domaine. Parmi ces conditions aux limites, il nous faut déterminer la vitesse de l'air, ainsi que la température de ce dernier entrant dans l'une des arcades latérales ouvertes sur l'extérieur (Figure 21). L'arcade retenue sera supposée représentative de toutes les autres. En effet, c'est l'arcade recevant le plus directement le rayonnement solaire, sans être vraiment sous l'ombrage d'un arbre. On voit en effet que la tache solaire entrant dans la galerie par cette arcade ne présente aucun ombrage.



Figure 21 : A gauche, l'arcade ouverte sur l'extérieure siège de la mesure, à droite, la tache solaire engendrée dans la galerie à 12h45, non biaisée par la végétation

D'autre part, il nous était impossible de réaliser les mesures au niveau de l'arcade d'accès au jardin depuis la place des Terreaux (Figure 18), cet endroit étant l'entrée du musée, donc passager, les mesures n'auraient pas été exploitables en plus d'être irréalisables. De la même façon, les mesures aux extrémités latérales de la galerie étaient irréalisables pour les mêmes raisons. Quelques relevés de températures et de vitesses d'air ont néanmoins pu être réalisés, permettant de poser certaines hypothèses concernant les valeurs des conditions aux limites, qui seront détaillés plus tard.

Les mesures ont été réalisées avec des sondes portatives permettant de mesurer à la fois la vitesse de l'air et la température ambiante. Ce sont les appareils KIMO VT 200, et TESTO 435, dont la description est précisée en annexe. Le premier a une précision de  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  en température pour des valeurs comprises entre  $-20$  et  $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ , et de  $\pm 0,03 \text{ m. s}^{-1}$  en vitesse d'air pour des valeurs comprises entre 0

et  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Le second a une précision de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  en température pour des valeurs comprises entre  $-50$  et  $+150^\circ\text{C}$ , et de  $\pm 0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en vitesse d'air pour des valeurs comprises entre  $0$  et  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Il nous a semblé important, avant de démarrer les mesures, de vérifier que les deux appareils fournissaient effectivement les mêmes valeurs pour les grandeurs mesurées, afin l'expérimentation ne soit pas faussée. Les valeurs obtenues en Figure 22 montre que, les deux sondes étant positionnées l'un à côté de l'autre, les valeurs affichées par les appareils sont identiques compte tenu de leur précision respective.



*Figure 22 : Vérification des valeurs affichées par les deux appareils de mesure*

La sonde était maintenue en l'air, au milieu de l'arcade et loin de l'expérimentateur afin de diminuer au maximum les perturbations liées à celui-ci ou simplement à la proximité des parois (Figure 22), pouvant biaiser le résultat des mesures. Ainsi, les chances d'obtenir la mesure exacte de la grandeur recherchée sont maximisées.

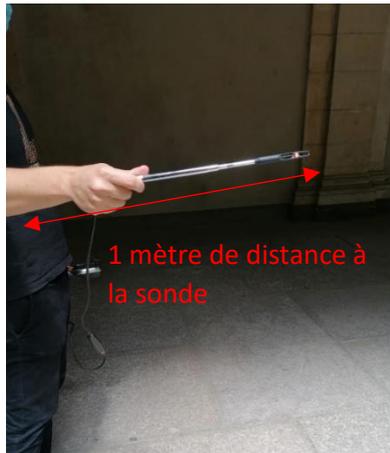
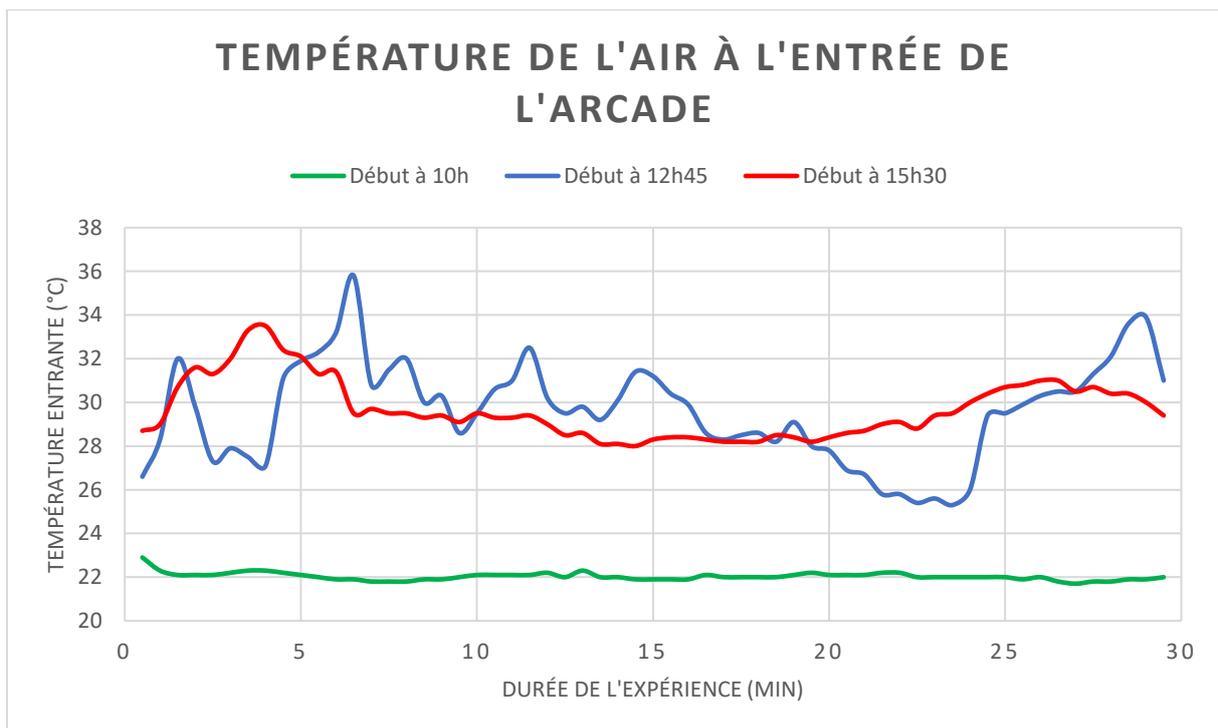


Figure 24 : Position de l'expérimentateur par rapport à la sonde

### 2.3.1. Température de l'air à l'entrée de l'arcade extérieure

Les trois sessions de mesures aux différents moments de la journée (cf 2.2.) ont débuté respectivement à 10h09, 12h53 et 15h35. Le pas de temps était de 30 secondes, sur une durée de 30 minutes comme exposé précédemment, soit un total de 60 mesures par grandeur. Sur les trois périodes, l'évolution de la température en fonction du temps ont été tracées.



Graphique 3 : Evolution de la température ambiante en fonction du temps à l'entrée de l'arcade. Les trois sessions de mesures sont superposées

Dans les courbes des sessions de 12h45 et de 15h30, on observe plusieurs périodes de températures similaires, entrecoupées de ruptures. Cela coïncide avec une modification de la couverture nuageuse,

limitant ainsi le rayonnement solaire direct et de ce fait, modifiant la température au niveau de l'entrée de l'arcade. La température mesurée pendant la session de 10h est significativement plus faible, car les conditions météo étaient médiocres, avec une couverture nuageuse importante tout au long de l'expérimentation de 10h.

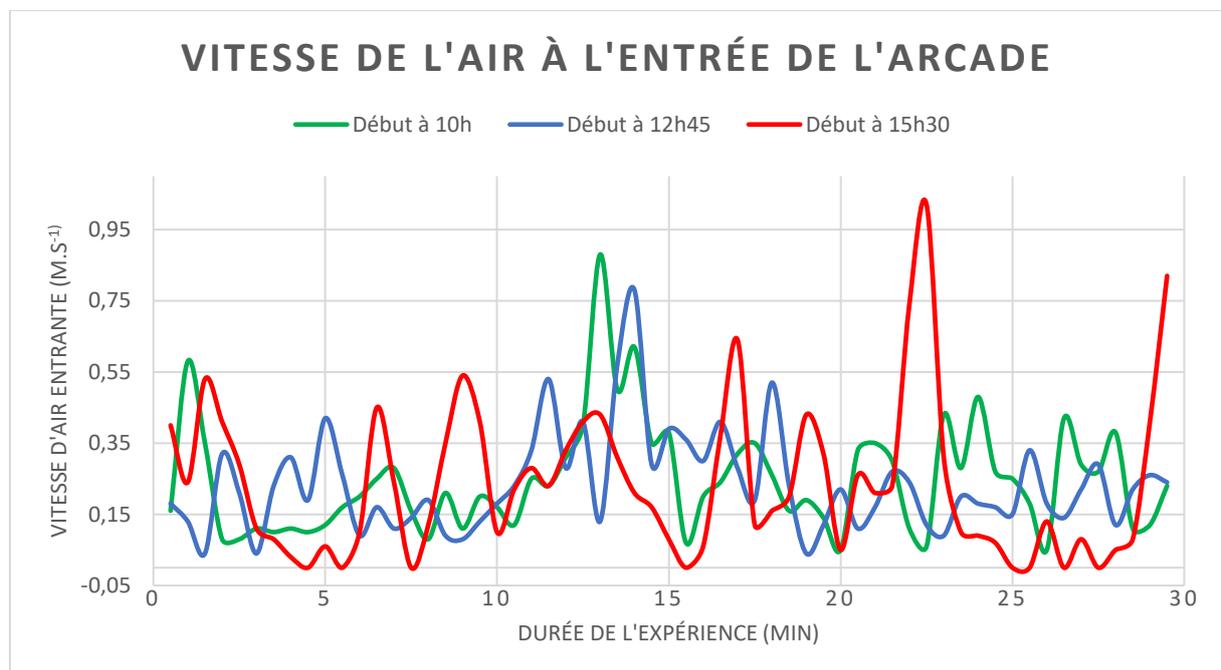
Grâce à ces résultats, il nous est possible d'obtenir des températures ambiantes moyennes, que l'on prendra pour conditions limites dans le paramétrage de notre simulation de référence (cf section 3.3.3.).

		Moyenne	Ecart-type
Température (°C)	Session de 10h	22,0	0,18
	Session de 12h45	29,6	2,29
	Session de 15h30	29,7	1,35

Le fait de paramétrer les conditions aux limites avec les moyennes est une hypothèse forte, malgré de faibles écarts-type de températures pour les sessions de 10h et de 15h30. Cependant, cette hypothèse, qui sera reprise dans les expérimentations suivantes, est fondamentale, car elle permet d'ancrer les conditions aux limites et donc le modèle de référence dans la réalité.

### 2.3.2. Vitesse de l'air à l'entrée de l'arcade extérieure

L'appareil de mesure étant le même pour la vitesse de l'air que pour la température de celui-ci, le pas de temps est identique, tout comme la durée, le début et le nombre de mesures. Ici également, l'évolution des vitesses d'air a été tracée en fonction du temps pour chaque session de mesures.



Graphique 4 : Evolution de la vitesse de l'air en fonction du temps à l'entrée de l'arcade. Les trois sessions de mesures sont superposées

Le profil de ces vitesses est chaotique, l'évolution est totalement aléatoire, il est impossible de rassembler des valeurs entre elles et d'expliquer leur évolution. On peut avancer une piste explicative, qui serait de rapprocher cet écoulement incident instable par de fortes perturbations dues à la morphologie urbaine locale.

Cependant, cette mesure a avant tout vocation à fournir des valeurs réelles de vitesse d'air que l'on pourra implémenter dans notre simulation de référence en tant que condition limite. Ainsi, il nous est possible de déterminer les valeurs moyennes pour chaque enregistrement, ce qui nous servira également pour déterminer les régimes d'écoulement dans la partie 3.2.

Nous avons ainsi les résultats suivants :

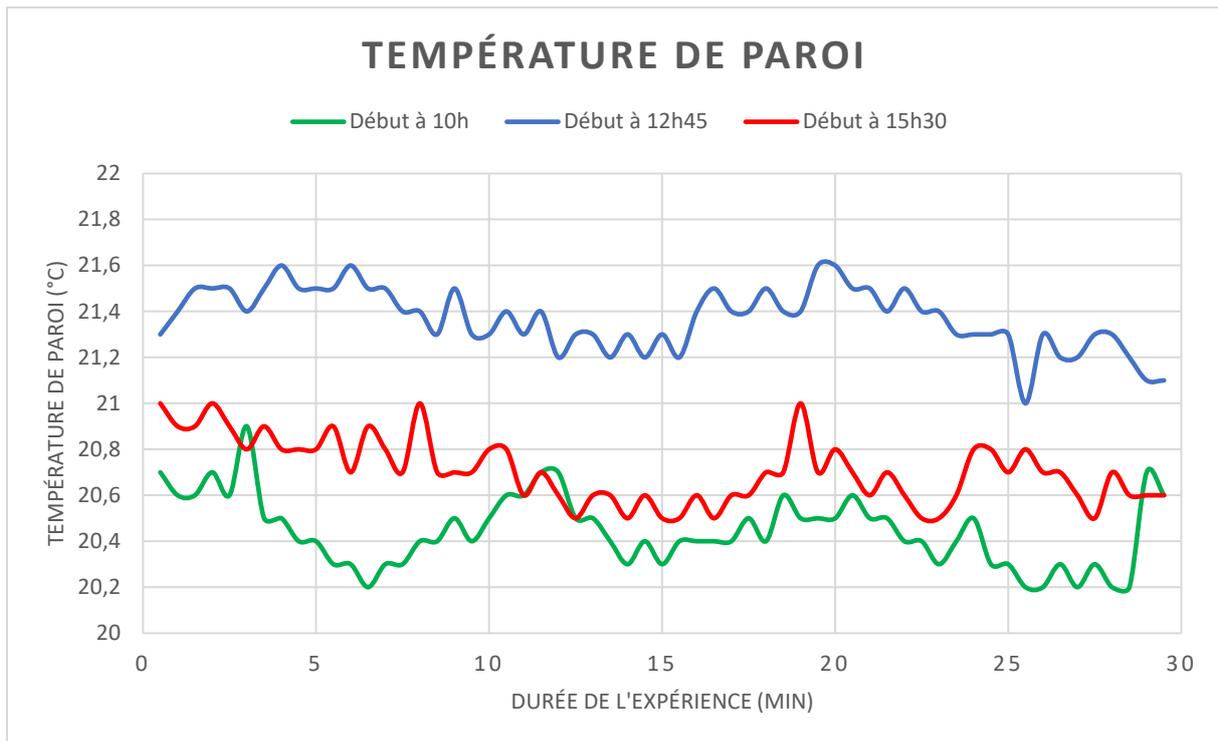
	Vitesse d'air (m.s <sup>-1</sup> )		
	Session de 10h	Session de 12h45	Session de 15h30
<b>Moyenne</b>	0,25	0,23	0,24

## 2.4. Mesures de températures de paroi

L'autre condition limite indispensable qui nous est nécessaire pour ancrer notre simulation dans la réalité est la température de surface des parois. Pour cela, nous disposons d'un thermomètre laser ThermoFlash Premium LX-26E, dont la fiche technique est disponible en annexe. Pour des raisons logistiques – manque d'expérimentateur, circulation de visiteurs – les mesures ont été réalisées sur une seule paroi pendant la phase de 30 minutes. D'autres relevés ont été effectués ponctuellement sur des parois différentes, afin de comparer aux valeurs obtenues sur les sessions de mesures. Les valeurs sur les autres parois étaient quasiment identiques à celles obtenues lors de la session de mesures. Ainsi, nous faisons ici l'hypothèse que les températures de parois sont homogènes non seulement sur une seule paroi, et identiques sur les différentes parois. Cette hypothèse est très forte mais ici aussi, cette mesure a vocation à fournir un ordre de grandeur de la température de paroi, afin de pouvoir ancrer notre simulation à venir dans la réalité.

Afin de fournir des mesures aussi précises que possible, il faut placer le thermomètre à environ 3 centimètres de la paroi que l'on souhaite étudier. Sa précision est de  $\pm 0,2$  °C entre 35°C et 42°C, et de  $\pm 0,5$  °C en dehors de cette plage. Il faut régler le mode sur « Surface » avant de pouvoir débiter les mesures. Là encore, l'expérimentateur doit se tenir éloigné autant que faire se peut de l'appareil afin de ne pas biaiser la mesure (Figure 24).

Les heures de début de mesures, la durée ainsi que le pas sont identiques à ceux des mesures au niveau de l'arcade. Nous avons tracé ici aussi l'évolution de la température de paroi en fonction du temps, avec les trois sessions d'expérimentation superposées.



Graphique 5 : Evolution de la température de paroi en fonction du temps à l'intérieur de la galerie. Les trois sessions de mesures sont superposées

Les températures de parois semblent à première vue très variables durant chaque session de mesures. Cependant, en déterminant les maxima et minima pour chaque session, on s'aperçoit que la variation maximale de température a lieu durant la première session avec  $\Delta T = 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui est faible relativement à la valeur moyenne de la température de surface – qui est de  $20,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

On s'aperçoit grâce à ce graphique que les températures de parois sont plus élevées durant la session de 12h45, ce qui peut sembler contre-intuitif. En effet, la paroi reçoit du rayonnement solaire réfléchi par la tache solaire sur le sol de la galerie. Ce rayonnement incident pendant toute la période où le Soleil irradie la galerie, on aurait pu penser que la paroi aurait emmagasiné ce rayonnement tout au long de cette période, augmentant par là même sa température de surface en fonction de l'avancée de la journée.

Ici également, il nous est possible d'obtenir la moyenne des températures de parois, ainsi que l'écart-type.

		Moyenne	Ecart-type
Température (°C)	Session de 10h	20,4	0,15
	Session de 12h45	21,4	0,13
	Session de 15h30	20,7	0,14

Au regard des écarts-type obtenus, qui sont là encore, négligeables devant la valeur des moyennes, il nous semble adapté de prendre pour condition limite de température de paroi la moyenne obtenue par les mesures sur site.

## 2.5. Mesures au sein de la galerie

Afin de vérifier la validité de la simulation de référence, il était nécessaire d'établir un point de comparaison par rapport à la réalité. C'est pourquoi il a été décidé de mesurer la température et la vitesse de l'air au sein de la galerie également afin de pouvoir comparer l'évolution réelle de ces deux grandeurs à l'évolution simulée. La section 2.3.2. a mis en évidence que le champ des vitesses d'air incident au niveau de l'arcade avait un profil chaotique, il est donc difficile de comparer véritablement les valeurs mesurées aux valeurs simulées. Concernant la vitesse de l'air, la comparaison se fera par rapport à l'ordre de grandeur des valeurs simulées par rapport à l'ordre de grandeur des valeurs mesurées.

Concernant le champ des températures, nous pouvons ici obtenir un point de comparaison bien plus précis. Il est possible de comparer les valeurs des températures, mais également de comparer l'apparition ou non d'un équilibre thermique au sein de la galerie – qui conférerait ainsi une certaine validité au modèle – ainsi que la date d'apparition de celui-ci dans la simulation ainsi que dans l'expérimentation.

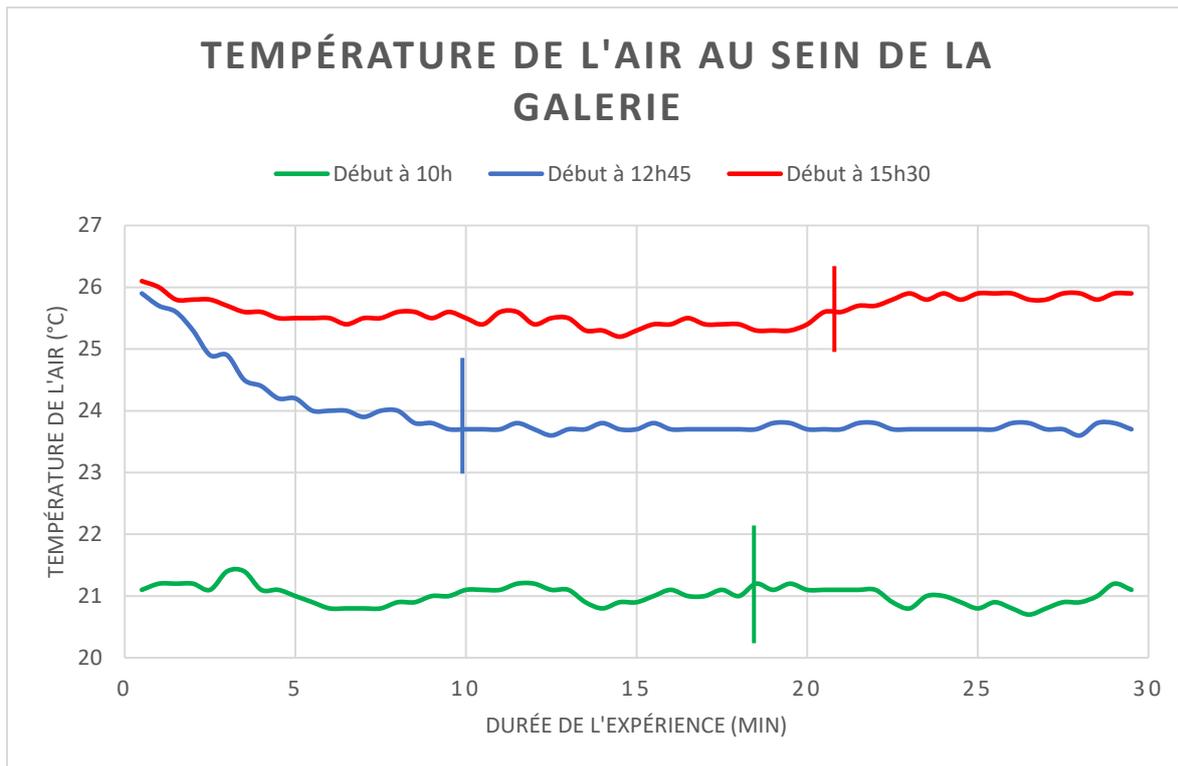


Figure 25 : A gauche, position de l'expérimentateur dans la galerie, à droite, hauteur de la sonde par rapport au sol

Les appareils utilisés pour la réalisation des mesures sont les mêmes que ceux présentés à la section 2.3. Les mesures ont été réalisées en même temps que celles au niveau de l'arcade de cette même section. L'expérimentateur était au milieu de la galerie, la sonde étant placée à 1,5 mètres de hauteur environ, qui est la hauteur à laquelle on évalue généralement la température ressentie par l'utilisateur d'un espace<sup>[28]</sup>. On utilisera donc la température à cette hauteur pour la comparaison.

### 2.5.1. Température de l'air au sein de la galerie

Ici également, les conditions d'expérimentation – heure de début, nombre de mesures, pas de celles-ci – sont les mêmes que celles exhibées dans la section 2.3. puisqu'elles ont été réalisées en simultanée. Nous avons tracé ici l'évolution de la température en fonction du temps pour les trois sessions d'expérimentation.



Graphique 6 : Evolution de la température de l'air en fonction du temps à l'intérieur de la galerie. Les trois sessions de mesures sont superposées

Pour chaque session d'expérimentations, le graphique semble montrer un régime transitoire avant l'atteinte d'un équilibre thermique. La date d'atteinte de l'équilibre thermique est mise en évidence par les barres verticales sur le Graphique 6. Celles-ci ont été placées arbitrairement et sont présentent donc une certaine imprécision, notamment dans les sessions de 10h et de 15h30. Cependant, la rupture entre le régime transitoire et l'équilibre thermique semble assez visible, ce qui nous permet de dater l'atteinte de cet équilibre. Ceci est récapitulé dans le tableau ci-après.

		Moyenne	Date de l'équilibre thermique (min)
Température (°C)	Session de 10h	21,0	21
	Session de 12h45	24,0	10
	Session de 15h30	25,6	18

### 2.5.2. Vitesse de l'air au sein de la galerie

Comme évoqué précédemment, ce qui nous intéresse ici n'est pas tant l'évolution de la vitesse de l'air au sein de la galerie que sa valeur caractéristique. Le graphique décrivant l'évolution de la vitesse d'air en fonction du temps a été tracé, et a également mis en évidence un régime chaotique, qu'il sera complexe d'exploiter. Plus prosaïquement, seules les valeurs moyennes ainsi que les écarts-type ont été déterminés afin de pouvoir obtenir des valeurs caractéristiques pour confronter la simulation aux mesures. Les résultats sont répertoriés ci-après.

		Moyenne	Ecart-type
Vitesse de l'air (m.s <sup>-1</sup> )	Session de 10h	0,13	0,10
	Session de 12h45	0,13	0,09
	Session de 15h30	0,15	0,13

Les valeurs d'écart-type montrent bien qu'il est impossible de dégager une tendance pour l'évolution des vitesses d'air au sein de la galerie. On a finalement simplement les valeurs caractéristiques des vitesses d'air pour chaque session d'expérimentation, que l'on assimilera aux moyennes de celles-ci.

## 2.6. Hypothèses – Regard critique – Approfondissement des mesures

### 2.6.1. Hypothèses additionnelles

La section 2.3. a mis en évidence l'impossibilité de réaliser les mesures au niveau de l'arcade l'entrée du musée (indiquée en Figure 18) puisque c'était un lieu extrêmement passager (lieu d'entrée et de sortie depuis et vers la place des Terreaux). En plus des difficultés pratiques que cet endroit passager posait, cela aurait biaisé les mesures à cause de la présence de personnes qui auraient généré des courants d'air locaux par leur déplacement et donc perturbé le relevé de vitesse d'air en plus de modifier localement la température de l'air.

Pour pallier cela, en parallèle des sessions de mesures, la sonde anémométrique – thermométrique a été placée au niveau de cette arcade lors d'un moment d'accalmie du flux entrant de visiteur, afin que la lecture des valeurs ne soit pas biaisée. Le but de cette action était de relever quelques valeurs à ce niveau puis de les comparer aux valeurs obtenues dans la galerie et au niveau de l'arcade de la section 2.3., afin de tenter d'établir une corrélation entre ces valeurs. L'arcade du niveau d'entrée étant orientée au nord, et précédée d'un couloir couvert, l'action du Soleil est quasiment nulle au niveau de l'entrée. Il a été constaté que les valeurs de vitesses d'air étaient environ de 0,15 m.s<sup>-1</sup> plus élevées que celles de l'air incident au niveau de l'arcade ouverte sur le jardin. Une piste explicative pourrait être l'effet Venturi créé par le couloir d'accès au jardin depuis la place des Terreaux, qui augmenteraient les vitesses d'air au niveau de l'arcade d'entrée par rapport à l'arcade ouverte sur le jardin.

Concernant la température de l'air incident à l'arcade d'entrée, les relevés indiquent des valeurs plus faibles que celles de l'arcade ouverte sur le jardin – ce qui est logique car le rayonnement solaire direct est totalement absent au niveau de l'entrée – qui sont quasiment constantes pour chaque session de mesures : 20 °C pour la session de 10h, 22 °C pour celle de 12h45 et 23,5 °C pour celle de 15h30.

Les hypothèses concernant l'arcade d'entrée sont donc les suivantes :

- Vitesse d'air plus élevée de 0,15 m.s<sup>-1</sup> par rapport aux relevés de l'arcades ouvertes sur l'extérieur.
- Température constante à 10h, 12h45 et 15h30, respectivement à 20, 22, et 23,5 °C

Ces hypothèses sont des hypothèses fortes, qui sont imprécises et simplifient considérablement la réalité. Nous tenons cependant à rappeler ici que nous cherchons simplement à obtenir des ordres de grandeurs de conditions aux limites pour pouvoir caler notre simulation à venir sur le réel, pas à décrire

précisément l'évolution de chaque grandeur pour chaque limite, cela serait impossible en plus de n'avoir aucune incidence sur le modèle. Nous avons donc les valeurs suivantes pour l'arcade d'entrée :

		<b>Moyenne</b>
<b>Vitesse de l'air (m.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Session de 10h</b>	0,40
	<b>Session de 12h45</b>	0,38
	<b>Session de 15h30</b>	0,39
<b>Température (°C)</b>	<b>Session de 10h</b>	20
	<b>Session de 12h45</b>	22
	<b>Session de 15h30</b>	23,5

Il nous faut enfin poser une hypothèse par rapport aux arcades latérales de la galerie (Figure 18). De même que précédemment, quelques relevés ont été réalisés afin de postuler une corrélation par rapport aux grandeurs dans la galerie ou au niveau de l'arcade ouverte sur le jardin. L'hypothèse la plus forte est de modéliser les extrémités de la portion de galerie réelle par des arcades, qui restreindraient donc l'écoulement d'air dans la simulation. Nous remarquons de plus que les valeurs de vitesse d'air semblent être identiques à celles relevées au sein de la galerie. L'approximation réalisée ici est que la vitesse de l'air au niveau des arcades latérales est la même que celle au sein de la galerie.

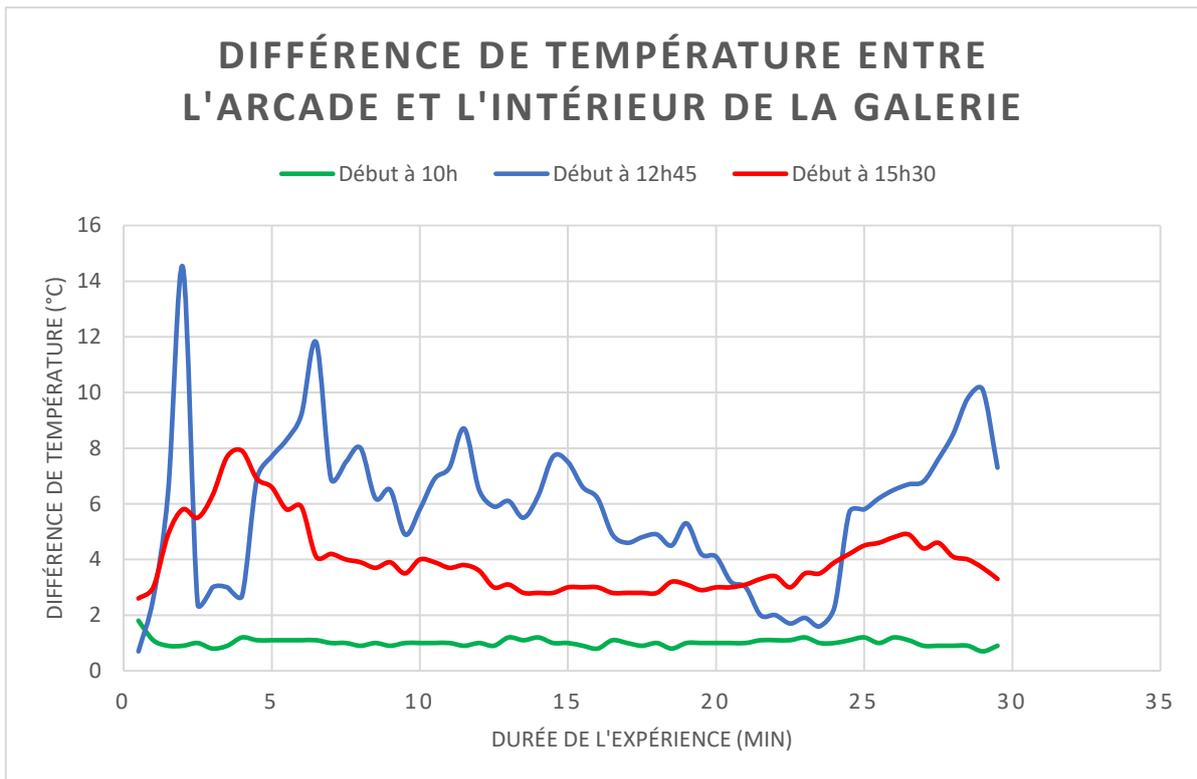
Pour la température, nous avons remarqué que les quelques valeurs relevées semblaient elles aussi constantes dans le temps, un peu plus élevées qu'au niveau de l'entrée. Nous posons donc que les températures sont uniformes dans le temps pour les sessions de 10h, 12h45 et 15h30, à 20,5, 22, et 24,5 °C respectivement, ce qui est résumé dans le tableau ci-dessous.

		<b>Moyenne</b>
<b>Vitesse de l'air (m.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Session de 10h</b>	0,13
	<b>Session de 12h45</b>	0,13
	<b>Session de 15h30</b>	0,15
<b>Température (°C)</b>	<b>Session de 10h</b>	20,5
	<b>Session de 12h45</b>	22
	<b>Session de 15h30</b>	24,5

### 2.6.2. Approfondissement des mesures

A partir des relevés réalisés précédemment, il est possible de déterminer d'autres grandeurs qui permettront de caractériser le confort au sein de la galerie. Dans le cas présent, les valeurs de vitesse d'air sont si faibles que cette grandeur ne semble pas être la plus pertinente pour évaluer le confort au sein de cet espace. Une grandeur qui nous semble plus pertinente serait la différence de température entre l'arcade ouverte sur l'extérieure – qui est exposée au Soleil et donc représentative d'un espace extérieur en été – et l'intérieur de la galerie, qui est le lieu d'étude recherché. Plus cette différence de température est importante, plus la galerie, considérée en tant qu'espace intermédiaire ouvert sur l'extérieur, est confortable.

L'évolution de cette différence de température en fonction du temps a été tracée ci-après avec les trois sessions de mesures superposées, de la même façon que les graphes précédents.



Graphique 7 : Evolution de la différence de température entre l'arcade ouverte sur le jardin et l'intérieur de la galerie. Les trois sessions de mesures sont superposées

On remarque de très nettes différences sur ce graphique. D'abord, on constate que la différence de température est la plus faible lors de la session du matin, ce qui semble logique puisque c'est à ce moment de la journée que la température extérieure est la moins élevée. On constate de plus que les variations dans cette différence de température sont beaucoup plus marquées lors de la session de midi que dans celle de l'après-midi. Ceci s'explique par la différence de couverture nuageuse lors de l'expérimentation de midi évoquée dans la section 2.3.1. De plus, la température est plus élevée dans la galerie lors de la session de l'après-midi d'après la section 2.5.1., ce qui explique également la différence de température moins élevée. Les différences moyennes ainsi que les écarts-type sont recensés ci-après.

		Moyenne	Ecart-type
Différence de température (°C)	Session de 10h	1,0	0,15
	Session de 12h45	5,8	2,64
	Session de 15h30	4,0	1,26

Le graphique et le tableau montrent plusieurs choses :

- La différence de température moyenne est d'autant plus importante que le Soleil est haut dans le ciel.
- La différence de température est d'autant plus sensible à l'évolution de la couverture nuageuse que le Soleil est haut dans le ciel.

Cela semble indiquer qu'en cas d'absence de couverture nuageuse – un cas typique de jour de canicule estivale à Lyon aujourd'hui tout comme dans le futur – la galerie offre un potentiel de confort bien plus intéressant que lors de la présence de nuages, grâce à sa température ambiante quasiment constante en dépit des variations de température extérieure. De plus, cela semble indiquer que le confort de cet espace est maximum quand le Soleil est haut dans le ciel.

### **2.6.3. Regard critique sur les mesures**

Après avoir réalisé toutes ces mesures, il convient d'en dresser les limites. Celles-ci sont de plusieurs natures :

- Celles liées à l'expérimentateur
- Celles liées aux appareils de mesures
- Celles liées aux conditions d'expérimentations

Les appareils, d'abord, présentent des incertitudes de mesures, ainsi qu'un temps de latence avant que les valeurs affichées soient stabilisées, ce qui a pu engendrer des écarts entre les valeurs relevées et les valeurs réelles.

L'expérimentateur, ensuite, peut être la source d'erreurs lors des mesures. D'une part par la position de la sonde, qui n'est pas exactement la même d'une mesure à l'autre et donc qui peut engendrer des variations, d'autres part par l'intervalle des mesures relevées qui peut varier de quelques secondes d'une mesure à l'autre.

Les conditions d'expérimentations, enfin, car elles n'offraient pas exactement les conditions souhaitées pour la simulation de la partie 3. En effet, bien que la végétation ne bloque pas le rayonnement solaire à l'endroit de la mesure réalisée, sa proximité a néanmoins pu jouer un rôle sur la température ambiante locale. Ce rôle aura potentiellement pu biaiser les mesures de température et de vitesse d'air. La présence d'une fontaine à proximité du lieu de mesures a également pu perturber et biaiser les valeurs de température relevées. Enfin, les dimensions des parois ne sont pas uniformes et les décorations architecturales font varier la surface de la galerie, qui n'est pas lisse et pas d'épaisseur constante.

Il convient également de souligner que les hypothèses posées précédemment, bien qu'expliquées et justifiées par des phénomènes physiques, ne sont en réalité que des approximations, parfois très imprécises, voire grossières, et qui sont donc la source d'erreurs potentiellement non négligeables. Elles étaient cependant indispensables au bon déroulement de la simulation présentée en section 3.

## 3. Construction du modèle de référence sur Ansys-Fluent

Le logiciel retenu est Ansys-Fluent pour la construction de mon modèle car l'interface avec l'utilisateur est très agréable et relativement intuitive. De plus, il me semblait être l'un des logiciels offrant le meilleur compromis entre précision recherchée et facilité de prise en main. Par sa conception, le logiciel offre un large panel de paramétrages, dont tous ceux qui m'étaient nécessaires dans le cas présent. De plus, la possibilité offerte de produire des résultats visuels très explicites et dynamiques rend la compréhension des résultats de simulation très aisée.

### 3.1. Présentation de l'interface

Le logiciel a été développé par l'éditeur de logiciels Ansys, spécialisé dans la simulation numérique. Le groupe propose des codes de simulation pour traiter des problèmes de nature très diverse comme de l'acoustique, de l'électromagnétisme, de l'hydrodynamique, de la thermodynamique, de la mécanique structurelle ou bien encore de la dynamique des fluides.

L'interface Ansys WorkBench se présente comme illustrée ci-dessous. Elle comporte un pré-processeur (Géométrie et Maillage), le solveur (Configuration et Solution) et le post-processeur (Résultats). Le solveur Fluent est un code de calcul très utilisé pour les problèmes de dynamique des fluides et permet de traiter des phénomènes de diverses natures (écoulements compressibles ou incompressibles, turbulence, écoulements multiphasiques, les transferts thermiques par différents modes).

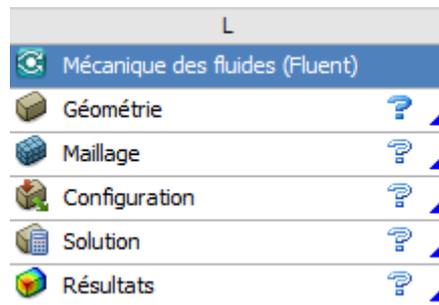


Figure 26 : Interface du logiciel ANSYS

#### 3.1.1. Le pré-processeur

Le pré-processeur est composé de la fenêtre Géométrie et de la fenêtre Maillage. La première permet de créer précisément la géométrie désirée pour le modèle, définissant ainsi les limites spatiales du domaine. Cela permet par la suite d'indiquer au logiciel où seront situées les conditions aux limites de ce domaine. Cette étape est donc le socle de toute la suite du travail de simulation, il est donc capital de dessiner le modèle le plus fidèlement possible par rapport au cas d'étude afin d'obtenir des résultats aussi proches que possible de la réalité.

La seconde fenêtre permet de créer le maillage. Les équations de la dynamique des fluides étant fortement non linéaires quel que soit le modèle, il est impossible d'obtenir une solution analytique, et donc impossible pour le solveur d'afficher une solution exacte. Afin de palier à ce problème, Fluent se base sur la méthode des volumes finis, qui consiste à découper la géométrie du modèle en volumes de

contrôle dans le but de résoudre de manière itérative les équations et aboutir à une solution approchée : c'est le maillage. Plus celui-ci sera fin, c'est-à-dire plus les volumes de contrôle petits, plus la distribution spatiale des solutions sera fidèle à la réalité. Cette étape est donc cruciale pour la suite des événements, car c'est à ce moment que sera déterminé coût en temps nécessaire pour la réalisation d'une simulation. C'est également lors de cette étape que l'on définit la forme des volumes de contrôle (tétraèdre, hexaèdre par exemple) ainsi que des zones spécifiques, que le logiciel comprendra comme la division du domaine spatial en fluide, parois, et conditions aux limites. Le maillage peut être raffiné en certains endroits afin d'étudier plus précisément l'évolution de certains phénomènes, dans des couches limites à proximité d'une paroi solide par exemple.

### 3.1.2. Le solveur

Le solveur se décompose en deux parties distinctes :

- La Configuration, qui est le lieu où l'on paramètre les conditions initiales, les caractéristiques physiques du fluide (incompressible ou non, son modèle de viscosité), les valeurs des conditions aux limites préalablement définies (cf 3.1.1.), ainsi que les caractéristiques des parois solides. C'est cette étape qui permet de paramétrer l'ensemble des conditions d'évolution de notre fluide au sein du domaine spatial et qui conditionne de ce fait la simulation.
- La Solution, qui est la fenêtre qui présente les résultats d'une simulation lorsque celle-ci est effectuée. On peut y voir l'évolution temporelle des paramètres qui nous intéressent sur des graphiques ou bien directement sur la géométrie du domaine, légendée par un code couleur.

Afin d'apporter une solution à ces équations non linéaires, le solveur Fluent procède par étape successive : il intègre d'abord les équations continues sur chaque maille, il les discrétise ensuite spatialement et temporellement, puis il approxime les dérivées partielles présentes dans les équations par des différences finies. Ainsi, le système d'équation initial est converti en un système algébrique, qui est résolu itérativement. Nous avons donc ici un processus qui n'aboutit qu'à une solution approchée de la réalité. De ce fait, il est important de définir à partir de quelle précision de résolution la solution peut être considérée comme fidèle à la réalité, d'où la définition de critères de convergence. Lors d'une simulation, Fluent trace automatiquement les résidus de plusieurs grandeurs, qui sont en fait les erreurs à chaque itération, et définit des critères de convergence à atteindre, résumés ci-dessous.

Equation concernée	Valeur de résidus à atteindre
<b>Continuité (équation (16))</b>	$10^{-3}$
<b>Vitesse selon x (équation (17))</b>	$10^{-3}$
<b>Vitesse selon y (équation (17))</b>	$10^{-3}$
<b>Vitesse selon z (équation (17))</b>	$10^{-3}$

<b>Energie (équation (18))</b>	$10^{-6}$
--------------------------------	-----------

Tableau 2 : Critères de convergence d'une simulation

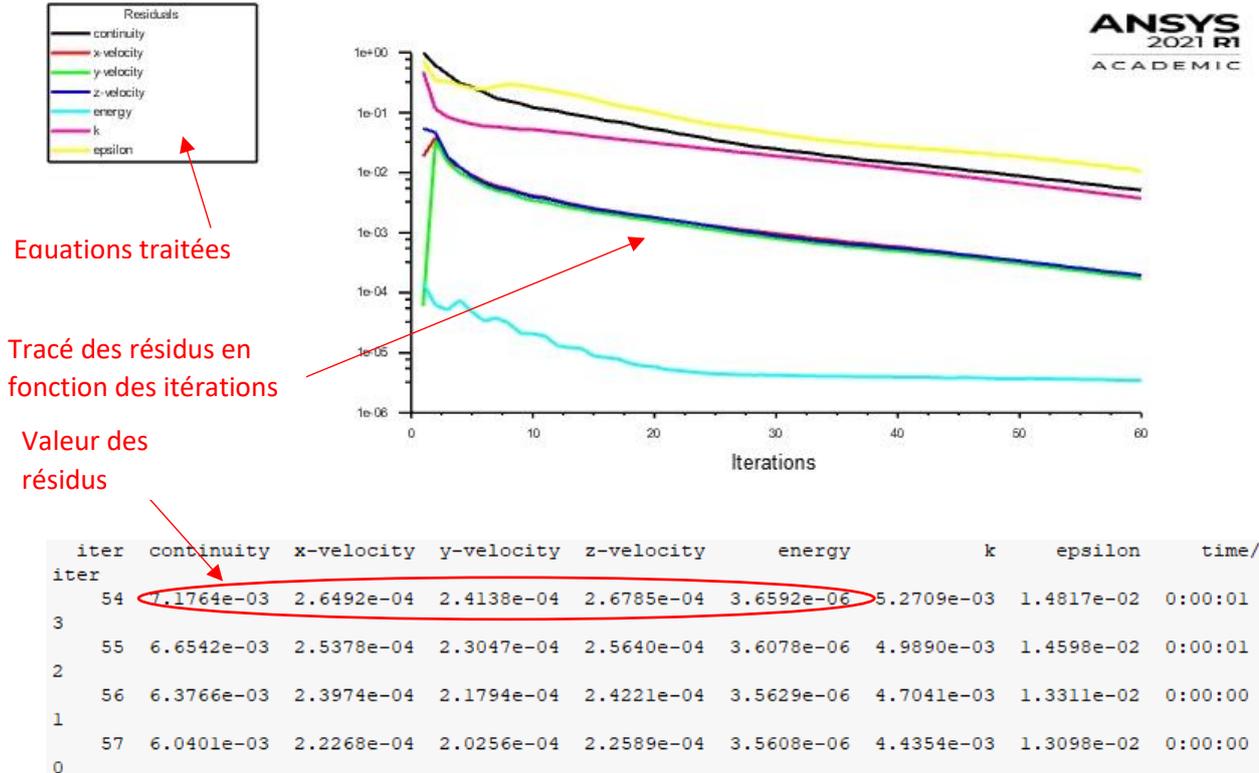


Figure 27 : Les résidus sur le solveur Fluent

### 3.1.3. Le post-processeur

Le post-processeur permet de traiter les résultats d'une simulation réalisée au préalable par grâce à la fenêtre Résultats. On peut y faire apparaître des iso grandeurs, des contours de certaines valeurs, des rendus par transparence avec une légende appropriée, mais on peut également y faire apparaître des lignes de courants ou des vecteurs de certaines grandeurs si nécessaire. Dans le cas d'une simulation dynamique, il est également possible de sélectionner l'affichage des résultats à différents instants de la simulation, ce qui permet de réaliser des comparaisons ou de mieux comprendre l'évolution temporelle d'un fluide en fonction de la géométrie du domaine ainsi que des conditions aux limites par exemple.

## 3.2. Les équations utilisées dans le modèle

### 3.2.1. Les équations de base

Afin de comprendre comment utiliser la partie Configuration du logiciel Ansys-Fluent, et donc de savoir comment paramétrer de façon adéquate le cas d'étude (caractéristiques du fluide, des parois, conditions aux limites), il est crucial de comprendre quelles équations permettent de décrire la dynamique d'un fluide, et quelle(s) influence(s) celles-ci peuvent avoir sur les simulations réalisées.

Ansys-Fluent étant un code de simulation de dynamique des fluides, les équations de base intervenant dans la simulation sont celles décrivant l'évolution d'un fluide dans le temps et dans l'espace. Une hypothèse et trois axiomes fondamentaux sont à la base de la description du mouvement d'un fluide :

- La continuité au sein d'un fluide, c'est-à-dire que l'on ne tient pas compte de la nature discrète de la matière à l'échelle moléculaire. Par conséquent, les grandeurs physiques caractérisant un fluide comme la densité, la pression, la température, et la vitesse sont continues dans l'espace. Elle traduit la conservation de la masse au sein d'un fluide.
- La conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et de l'énergie au sein d'un fluide.

Ces équations sont écrites ci-dessous dans une version locale, permettant de décrire n'importe quel cas, et peuvent être adaptée en fonction d'un cas spécifique. Ainsi, dans certaines d'entre elles, en fonction des conditions temporelles et spatiales, des caractéristiques intrinsèques au fluide, certains termes peuvent être négligés ou approximés, simplifiant les équations.

$$\text{Equation de continuité: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = \sum_i \rho_i q_i \quad (1)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide,  $t$  le temps,  $\vec{v}$  le vecteur vitesse du fluide, et  $q_i$  les puits (valeurs négatives) ou sources (valeurs positives) de masse au sein de l'élément de volume du fluide  $dV$ .

$$\text{Equation de quantité de mouvement: } \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{P} + (\rho - \rho_0) \cdot \vec{g} \quad (2)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide,  $\rho_0$  sa masse volumique au repos,  $t$  le temps,  $\vec{v}$  le vecteur vitesse du fluide,  $\vec{g}$  le champ de gravité ou toute autre force extérieure, et  $\vec{P}$  le tenseur des contraintes.

$$\text{Equation d'énergie: } \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho E \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{P} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{g} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{q} + \vec{q}_r) \quad (3)$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide,  $t$  le temps,  $\vec{v}$  le vecteur vitesse du fluide,  $\vec{g}$  le champ de gravité ou toute autre force extérieure,  $\vec{P}$  le tenseur des contraintes,  $E$  l'énergie massique totale,  $\vec{q}$  et  $\vec{q}_r$  sont respectivement les flux de chaleur par conduction et par rayonnement.

### 3.2.2. Équations complémentaires utilisées

#### 3.2.2.1. Tirage thermique

Au sein de la galerie qui est un espace ouvert sur l'extérieur, le microclimat est impacté par les mouvements d'air engendrés par le tirage thermique. Afin de caractériser l'importance de ceux-ci, différents nombres adimensionnels peuvent être utilisés comme le nombre de Grashof  $Gr$  ainsi que le nombre de Reynolds  $Re$ . Le premier se définit comme le rapport des forces de gravité et des forces visqueuses du fluide. Le second est construit sur le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses. En faisant la division du premier par le second élevé au carré, on peut évaluer l'importance des échanges thermiques au sein du fluide. Ce rapport s'écrit comme suit :

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta\Delta TL}{v^2} \quad (4)$$

où  $g$  est la valeur de la pesanteur,  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique du fluide considéré – ici l'air,  $\Delta T$  est la différence de température au sein de l'espace qui induit l'effet de tirage thermique,  $L$  la longueur caractéristique du problème, et  $v$  la valeur caractéristique de la vitesse de fluide, c'est-à-dire loin des singularités (couches limites avec la paroi par exemple).

Dans le cas présent, les valeurs caractéristiques sont :  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $\beta = \frac{1}{T} = 0,0033 \text{ K}^{-1}$ ,  $L = 10 \text{ m}$ ,  $\Delta T = 3,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , et  $v = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$ . On obtient finalement  $\frac{Gr}{Re} = 12,9$

Lorsque ce rapport est supérieur à 1 – c'est ici le cas, il faut tenir compte des effets de tirage thermique dans le modèle. Pour cela, une approximation, formulée par Boussinesq, permet de décrire simplement la masse volumique comme une constante de la température dans les équations, sauf dans le terme de tirage thermique. On a l'approximation suivante :

$$\|\vec{g}\|(\rho - \rho_0) \approx \|\vec{g}\|\beta\rho_0(T - T_0) \quad (5)$$

Cette approximation est valable lorsque les variations de masse volumique sont faibles devant 1, soit  $(\rho - \rho_0) \ll 1 \leftrightarrow (T - T_0) \ll 250$ . Or ici, les différences de températures constatées dans la galerie sont de 3,6 °C en moyenne, l'approximation est donc valable.

### 3.2.2.2. Transferts thermiques

L'évolution du microclimat au sein de la galerie sera principalement impactée par la température au sein de celle-ci, il faut donc bien sûr bien comprendre les différents modes thermiques dans le cas d'étude.

Les parties solides du domaine que sont les parois de la galerie seront le siège d'une conduction thermique. Les équations utilisées pour décrire ce phénomène sont la loi de Fourier, ainsi que l'équation de la chaleur, établie par un bilan thermique, et explicitées ci-dessous, dans le cas d'une conductivité thermique indépendante de la température.

$$\text{Loi de Fourier: } \vec{\varphi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (6)$$

$$\text{Equation de la chaleur: } \lambda \nabla^2 T = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

où  $\vec{\varphi}$  est la densité de flux de chaleur,  $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau,  $T$  est la température,  $\rho$  la masse volumique du milieu considéré et  $C_p$  est la chaleur spécifique de celui-ci.

La convection concerne la partie fluide du domaine, à savoir l'air dans notre cas. Des échanges de chaleur peuvent avoir au lieu au sein même du fluide ou bien entre un fluide et un solide adjacent (ici les parois de la galerie). Ces deux phénomènes sont décrits respectivement par l'équation d'advection-diffusion de la chaleur issue de l'équation de l'énergie (3), et par la loi phénoménologique de Newton ci-dessous.

$$\text{Loi phénoménologique de Newton: } \vec{\varphi} = h\vec{n}(T_S - T_F) \quad (8)$$

où  $\vec{\varphi}$  le flux surfacique de chaleur convectif,  $h$  le coefficient de transfert thermique,  $\vec{n}$  la normale sortante au solide, et  $T_S$  et  $T_F$  sont respectivement la température de surface du solide et la température du fluide loin de la couche limite.

Le rayonnement, enfin, va concerner principalement les parois recevant directement le rayonnement solaire – comme les arcades de la galerie exposées au Soleil par exemple – et qui vont réfléchir une partie de ce rayonnement dans la galerie. Les flux de chaleurs radiatifs sont décrits par plusieurs lois, dont la plus importante est la loi de Stefan-Boltzmann ci-dessous, qui permet d'estimer le flux émis par un corps en fonction de sa température de surface.

$$\text{Loi de Stefan – Boltzmann: } M = \varepsilon\sigma T^4 \quad (9)$$

où  $M$  est l'émittance du corps,  $T$  est la température de surface de celui-ci,  $\varepsilon$  son émissivité et  $\sigma$  est la constante universelle de Stefan-Boltzmann.

Ce phénomène fait également intervenir les notions de corps noir et de corps gris, les coefficients d'absorption ( $\alpha$ ), de transmission ( $\tau$ ), et de réflexion ( $\rho$ ) du rayonnement incident sur un corps, ainsi que l'émissivité ( $\varepsilon$ ) de celui-ci. Ces quatre grandeurs sont intrinsèques au corps considéré, comprises entre 0 et 1, et reliées entre elles par les relations suivantes :

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (10)$$

$$\text{Loi de Kirchhoff: } \varepsilon = \alpha \quad (11)$$

Le corps noir est un corps considéré comme un radiateur parfait, c'est-à-dire qu'il absorbe tout ce qu'il reçoit. Par la loi de Kirchhoff, il a une émissivité maximale. Les grandeurs précitées sont normalement dépendantes de la position de la raie émise sur le spectre électromagnétique, c'est-à-dire de la longueur d'onde de celle-ci. Le corps gris est un concept permettant de passer outre cette règle, et qui permet de considérer ces grandeurs comme indépendantes de la longueur d'onde de la raie émise, ce qui est une hypothèse simplificatrice.

### 3.2.2.3. Turbulence du fluide

Il est nécessaire de déterminer dans quel régime d'écoulement se situe l'air évoluant dans la galerie afin de savoir si l'on doit ou non tenir compte de la turbulence dans le modèle. Le régime d'écoulement peut se déterminer par rapport à des valeurs seuils de différents nombres adimensionnels comme le nombre de Reynolds  $Re$  ou le nombre de Rayleigh  $Ra$  par exemple.

Dans le cas du nombre de Rayleigh, en deçà de  $10^8$ , le régime est laminaire, au-delà de  $10^{10}$ , le régime est turbulent, avec un régime d'écoulement transitoire entre les deux. Ce nombre s'exprime de la façon suivante :

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\alpha\nu} \quad (12)$$

où  $g$  est la valeur du champ de pesanteur,  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique volumique de l'air,  $\Delta T$  est la différence de température au sein de l'espace,  $L$  est la longueur caractéristique du problème,  $\alpha$  est la diffusivité thermique de l'air et  $\nu$  sa viscosité cinématique. Dans le cas de l'approximation des gaz parfaits – qui peut s'appliquer pour de faibles pressions – le coefficient de dilatation thermique d'un gaz se calcule simplement par  $\beta = \frac{1}{T}$ .

Ici, nous avons  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,  $\beta = 0,0033 \text{ K}^{-1}$ ,  $L = 10 \text{ m}$ ,  $\Delta T = 3,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 20\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , et  $\nu = 15,6\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

On obtient  $Ra = 3,7.10^{11}$ . On est donc en régime turbulent, il faut l'intégrer aux simulations.

Plusieurs modèles de turbulence sont disponibles sur Fluent pour répondre à cela. Dans le cas de convection naturelle de l'air dans un espace extérieur – ce qui est notre cas ici – il a été montré que le modèle le plus pertinent sur Fluent est le modèle « Realizable  $k - \epsilon$  »<sup>[32]</sup>. Par réalisable, on désigne le fait que le modèle doit respecter des situations asymptotiques, avec par exemple des valeurs de  $k$  et  $\epsilon$  qui ne deviennent jamais négatives.

Ce modèle est composé de deux équations de transport donnant une description générale de la turbulence : une pour l'énergie cinétique de turbulence «  $k$  » et une pour le taux de dissipation de la turbulence «  $\epsilon$  ». La dissipation turbulente est la vitesse à laquelle les fluctuations de vitesses se dissipent. Dans le modèle  $k - \epsilon$ , la viscosité turbulente est déterminée à partir d'une échelle de longueur de turbulence unique. Un coefficient critique a été ajouté dans le modèle « Realizable », exprimé en fonction du débit moyen et des propriétés de turbulence, au lieu d'être supposé constant comme dans le modèle standard. Les équations décrivant le modèle de turbulence  $k - \epsilon$  sont décrites en annexes. Il faudra néanmoins déterminer la valeur des précédents coefficients, grâce aux relations suivantes :

$$k = \frac{3}{2}(v_m I)^2 \quad (13)$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (14)$$

où  $v_m$  est la vitesse moyenne de l'écoulement dans la galerie,  $I$  est l'intensité de la turbulence – d'environ 5% pour notre cas d'étude,  $C_\mu$  est une constante déterminée empiriquement et est égale à 0,09,  $l$  est l'échelle de longueur de la turbulence exhibée ci-dessus, reliée à la longueur caractéristique du problème  $L$  de façon approximative par  $l = 0,07L$ .

### 3.2.3. Adaptation des équations au cas d'étude

En formulant certaines hypothèses sur notre cas d'étude, il est possible d'adapter et de simplifier les équations fondamentales de la dynamique des fluides. On peut raisonnablement supposer que l'air dans la galerie étudiée est incompressible. Une condition simple permet de vérifier cela, faisant intervenir un nouveau nombre adimensionnel, le nombre de Mach  $Ma$ . Cette condition est exposée ci-après :

$$\begin{cases} Ma < 0,3 \\ Ma = \frac{v_{fluide}}{v_{son}} \end{cases} \quad (15)$$

où  $v_{son}$  est la célérité du son dans le fluide considéré, ici l'air, et vaut  $343 \text{ m.s}^{-1}$ , et  $v_{fluide}$  la vitesse moyenne dans l'air. On a ici  $Ma = 8,7.10^{-4}$ . Le fluide est donc incompressible. Cela se traduit par une masse volumique de celui-ci indépendant du temps. De plus, on peut raisonnablement postuler que l'écoulement d'air dans la galerie se fait sans perte ni création de masse, et que celui-ci est homogène, c'est-à-dire ses variations de masse volumique négligeables dans l'espace. L'équation de continuité devient alors :

$$\text{Equation de la continuité: } \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (16)$$

Ayant posé ces hypothèses, l'équation d'énergie est découplée des équations de continuité et de quantité de mouvement, on peut ainsi déterminer la vitesse et la pression indépendamment l'une de l'autre. L'expression de l'équation de quantité de mouvement se simplifie alors considérablement :

$$\text{Quantité de mouvement: } \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{\nabla} \cdot (\vec{v} \vec{v}') = -\vec{\nabla} \cdot p + \nu \nabla^2 \vec{v} - \vec{g} \beta \rho_0 (T - T_0) \quad (17)$$

où  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'air.

En négligeant les flux de chaleurs par conduction et par rayonnement dans l'air par rapport à la convection, l'équation de la chaleur, quant à elle, devient :

$$\text{Equation de l'énergie: } \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) T = -p \nabla^2 T + \rho \vec{g} \cdot \vec{v} \quad (18)$$

### 3.3. Réalisation du modèle du site de l'étude

#### 3.3.1. La géométrie

La construction du modèle de référence s'est faite sur la base du site de mesures – une portion de la galerie orientée au sud du jardin du musée des Beaux-Arts (cf 2.1.1.). Les dimensions ont été relevées sur place, et sont exposées sur le plan ci-dessous. L'arcade modélisant l'accès au musée depuis la place des Terreaux est de mêmes dimensions que celles sur la paroi opposée, et située précisément en face de l'arcade centrale de cette paroi. De même, les deux arcades latérales sont de mêmes dimensions et positionnées de la même façon par rapport à l'extrémité de la galerie.

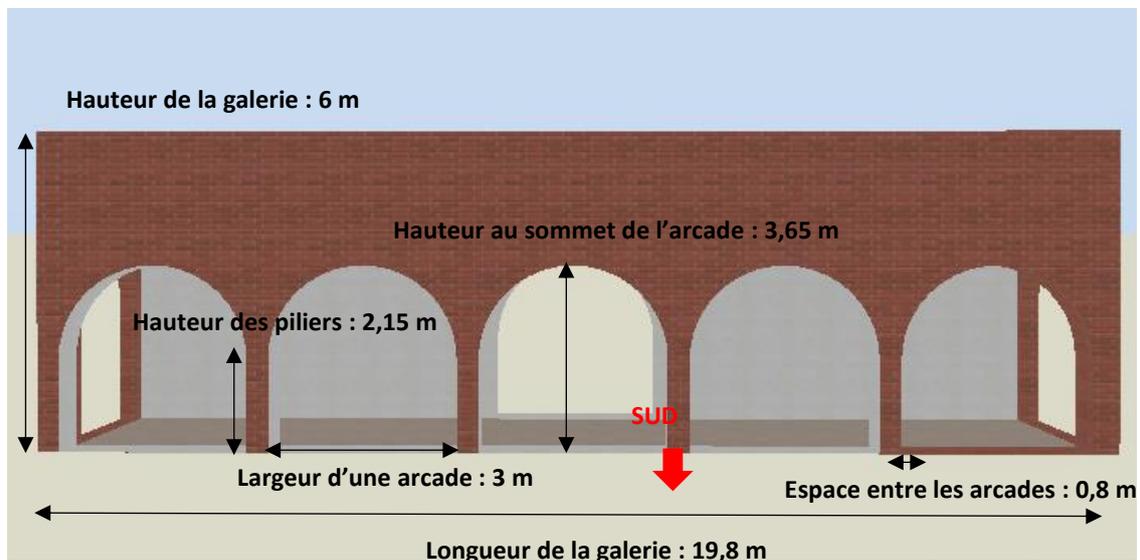


Figure 28 : Dimensions de la galerie – Plan XY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> La formalisation des plans de coupe est explicitée en annexe.

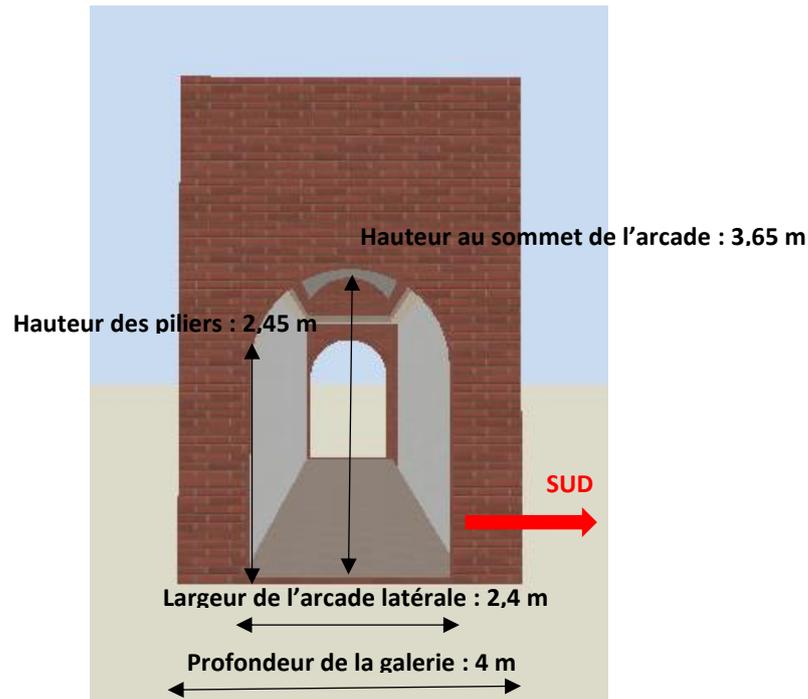


Figure 29 : Dimensions de la galerie – Plan ZY<sup>1</sup>

La galerie dans son entièreté étant beaucoup plus longue que la portion de référence, le modèle construit ne sera qu'une approximation de la réalité. Il était en effet impossible de modéliser toute la galerie, car en certains endroits, un couvert végétal important aurait biaisé l'analyse des résultats quant à l'influence des facteurs géométriques de la conception sur le microclimat. Bien que le côté fermé de la galerie présente quelques ouvertures vers l'intérieur (des fenêtres essentiellement), celles-ci n'ont pas été prises en compte dans la simulation car l'objectif était de modéliser globalement la galerie. Il en va de même pour les éléments de décoration architecturale qui modifient quelque peu la géométrie à une échelle fine. Le plafond, qui en réalité est voûté, ne l'est pas sur le modèle car cela était complexe à modéliser. Il est donc plat, à la hauteur de la clé de voûte de la galerie réelle. Des ouvertures ont été ajoutées aux extrémités ainsi qu'une ouverture sur le côté normalement fermé de la galerie dans le but de représenter l'entrée du musée depuis la place des terreaux, comme illustré ci-dessous.

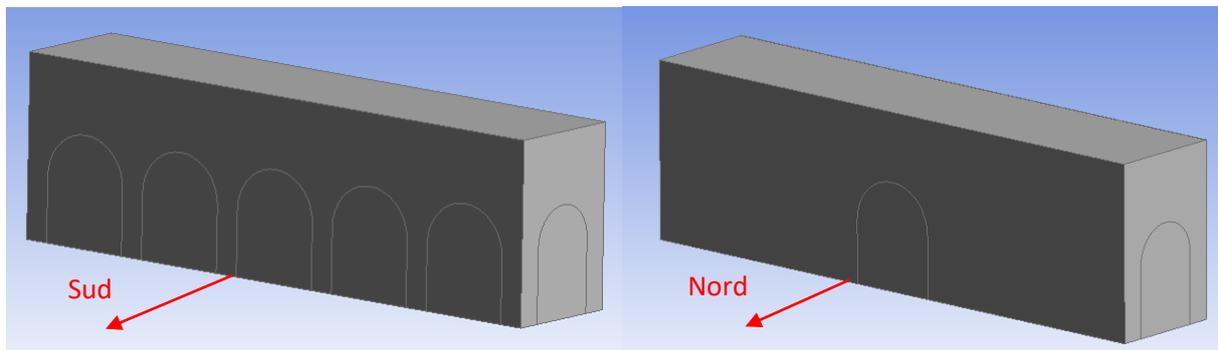


Figure 30 : La géométrie du modèle créé sous ANSYS – Design Modeler

Afin de tenir compte de la position du Soleil dans le ciel, et de l'impact de celle-ci sur le microclimat, il a fallu insérer dans la géométrie la tache solaire engendrée dans la galerie au niveau de chaque arcade ouverte sur l'extérieur. Pour cela, il est nécessaire de connaître la hauteur et l'azimut du Soleil à un instant donné. On peut ensuite déterminer la tache solaire engendrée, comme expliqué ci-après.

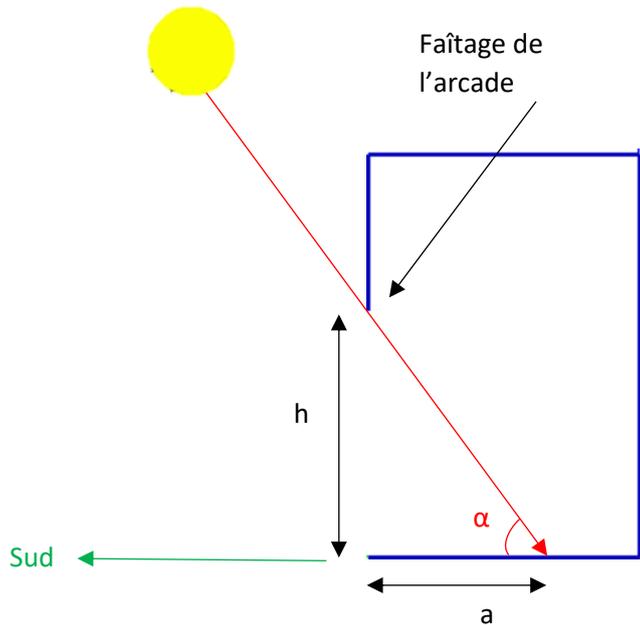


Figure 31 : Profondeur de la tache solaire engendrée dans la galerie en fonction de la hauteur du Soleil – Plan ZY

Grâce au schéma précédent, on peut déterminer la profondeur de la tache dans la galerie par trigonométrie :  $\tan \alpha = \frac{h}{a}$ , soit  $a = \frac{h}{\tan \alpha}$  avec  $h$  la hauteur au sommet de l'arcade, qui est connue, et  $\alpha$  la hauteur du Soleil dans le ciel, également connue.

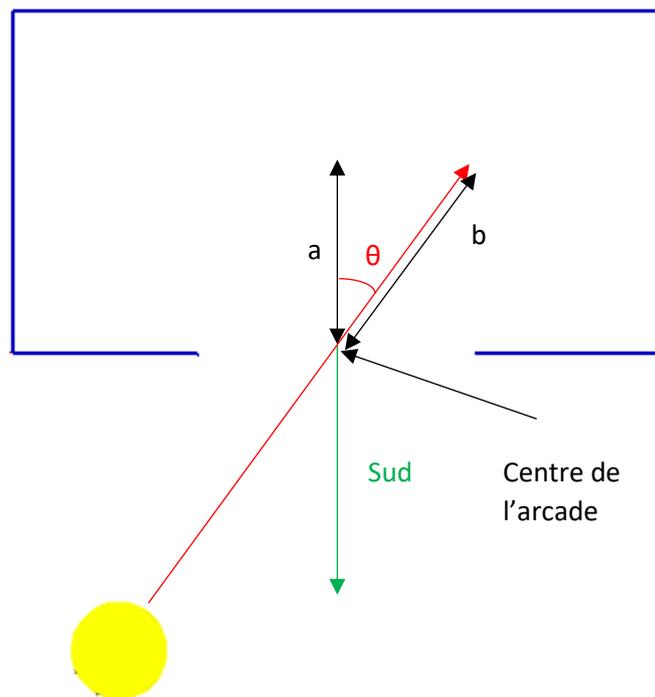


Figure 32 : Décalage de la tache solaire dans la galerie en fonction de l'azimut du Soleil – Plan ZX

Grâce au schéma précédent, on peut déterminer le décalage de la tache sur la largeur de la galerie par trigonométrie :  $\cos \theta = \frac{a}{b}$ , soit  $b = \frac{a}{\cos \theta}$  avec  $a$  la profondeur de la tache dans la galerie au niveau du faîtage de l'arche qui est connue, et  $\theta$  l'azimut du Soleil dans le ciel, également connu. On peut procéder de la même façon en prenant comme dimension connue  $h$ , la hauteur des piliers au lieu de la hauteur au sommet de l'arcade.

Une fois la position des points remarquables déterminée, il est possible de tracer précisément les taches solaires dans la géométrie. Le résultat précis du tracé de la géométrie du modèle est présentée dans la Figure 33.

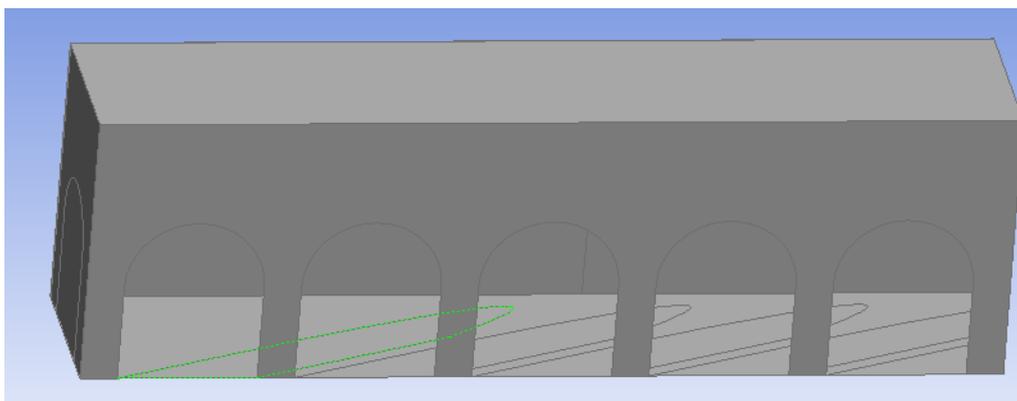


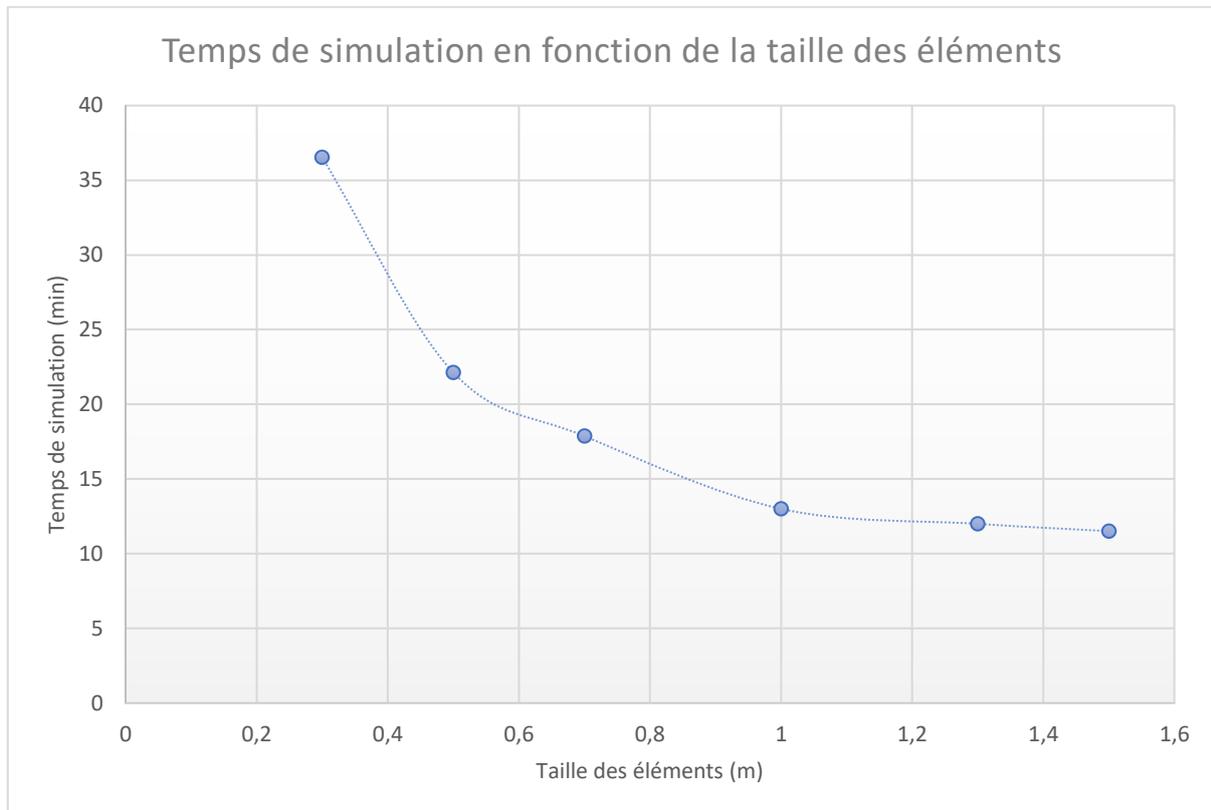
Figure 33 : Tracé des taches solaires dans la galerie

### 3.3.2. Le maillage

La seconde étape de la construction du modèle est le maillage, qui consiste en un découpage spatial de la géométrie en volumes de contrôle. Les équations exhibées précédemment (cf 3.2.) étant non linéaires, le code de résolution Fluent les résoudra sur chacun de ces volumes, par itération successive, en utilisant la méthode des différences finies. Ainsi, pour obtenir des résultats précis, qui sont le plus proches possible de la réalité, on recherche souvent à créer un maillage raffiné, c'est-à-dire des volumes de contrôle de faible taille, afin de résoudre les équations sur un nombre bien plus conséquent de volumes, et donc faire tendre la discrétisation spatiale de la géométrie vers la solution la plus précise possible. Cependant, la résolution d'équations sur un nombre conséquent de volumes de contrôle va engendrer une forte augmentation du temps de simulation (cf 3.1.1.). Il est donc important ici de trouver le bon compromis entre précision du maillage, et coût en temps de simulation, afin d'être en mesure de réaliser le nombre conséquent de simulations que cette étude exige.

Il a donc fallu essayer différents maillages en modifiant à chaque fois la taille des arêtes des volumes de contrôle et lancer les simulations associées afin de pouvoir évaluer qualitativement la précision que ceux-ci permettaient d'obtenir. Pour ce faire, nous sommes partis d'un nombre conséquent de volumes de contrôle – le nombre maximum disponible sur cette version étudiante du logiciel était de 500 000 – pour tendre vers des maillages de plus en plus grossiers. Les temps de simulation étaient

relevés, ainsi que la précision finale de la solution fournie par Fluent. Les résultats sont présentés ci-après.



Graphique 8 : Evolution du temps de simulation en fonction de la taille des volumes de contrôle

Ce graphique illustre parfaitement le temps de simulation gagné lorsque le maillage devient plus grossier. Cependant, à partir d'une taille d'éléments de 1,5 mètre, la précision finale obtenue après la simulation est bien moins bonne. De plus, le gain de temps finit par tendre vers 0 lorsque l'on augmente la taille des éléments. Les conditions de simulations implémentées dans le solveur Fluent sont des valeurs approximatives, fournies dans le rapport Ruros<sup>[28]</sup>, le but étant seulement d'analyser le gain en temps en fonction de la taille des éléments. La simulation réalisée était en régime transitoire, avec un total de 600 itérations. Il ressort de cette analyse que la taille des éléments proposées automatiquement par le logiciel Ansys-Fluent lors de l'étape du maillage semble idéale pour trouver le bon compromis entre vitesse de simulation et précision obtenue après la simulation. Pour les simulations futures, la taille des éléments sera donc automatiquement choisie par le logiciel.

Pour une simulation de 1h avec un pas de temps de 30 secondes, et 5 itérations par pas de temps

La création du maillage ne se fait pas n'importe comment, il est important de respecter au mieux les critères énumérés et illustrés ci-dessous :

- Les volumes ne doivent pas être trop étirés, et avoir un ratio d'aspect (largeur/longueur) pas trop faible.
- Les volumes ne doivent pas être trop distordus, c'est-à-dire que deux arêtes adjacentes doivent être le plus proche possible de l'orthogonalité.

- Deux volumes adjacents doivent avoir des tailles similaires, la transition entre ceux-ci doit s'effectuer en douceur. Il est possible de paramétrer le logiciel afin qu'il crée un maillage respectant automatiquement ce critère.



Figure 34 : Critères à respecter pour un maillage de bonne qualité

Afin de s'assurer de la bonne qualité d'un maillage, plusieurs indicateurs ont été créés, et permettent de quantifier ces critères qualitatifs. Par exemple, la qualité orthogonale du maillage est un nombre variant entre 0 et 1, qui évalue l'orthogonalité locale des arêtes adjacentes deux à deux. Lors de l'étape de maillage, on peut choisir la forme des volumes de contrôle, parmi des tétraèdres, des prismes droits, des pyramides ou des hexaèdres, ou bien encore un mélange de ces différentes formes par exemple. En fonction de la ou des forme(s) retenue(s), la qualité orthogonale du maillage sera différente.

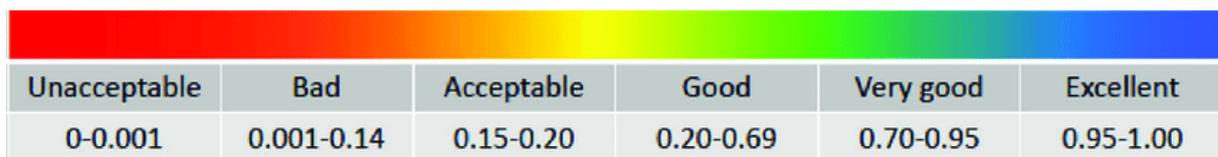


Figure 35 : Qualité du maillage selon sa qualité orthogonale

Comme on peut le supposer grâce au tracé de la géométrie (cf 3.3.1.), et comme illustré sur la Figure 36, il est impossible d'obtenir un maillage parfaitement orthogonal. En effet, des géométries particulières, des formes arrondies par exemple, ou des angles très aigus ou très obtus vont faire diminuer la qualité orthogonale.

Dans un premier temps, la géométrie du problème étant relativement simple, la méthode choisie pour réaliser le maillage est une méthode de création automatique proposée par le logiciel Ansys-Fluent, méthode permettant d'optimiser le respect des critères exposés ci-dessus. La forme des volumes utilisés est exclusivement tétraédrique avec cette méthode. Les caractéristiques du maillage sont résumées dans la Figure 36. Il est possible d'afficher la distribution spatiale des qualités orthogonales locales. Notre maillage affiche une valeur minimum de 0,128, et une valeur moyenne de 0,759 – avec une faible écart type de 0,124, donc avec des valeurs locales peu éloignées dans l'ensemble de cette moyenne – ce qui confère au maillage réalisé une qualité de très bonne d'après la Figure 35 ci-dessus.

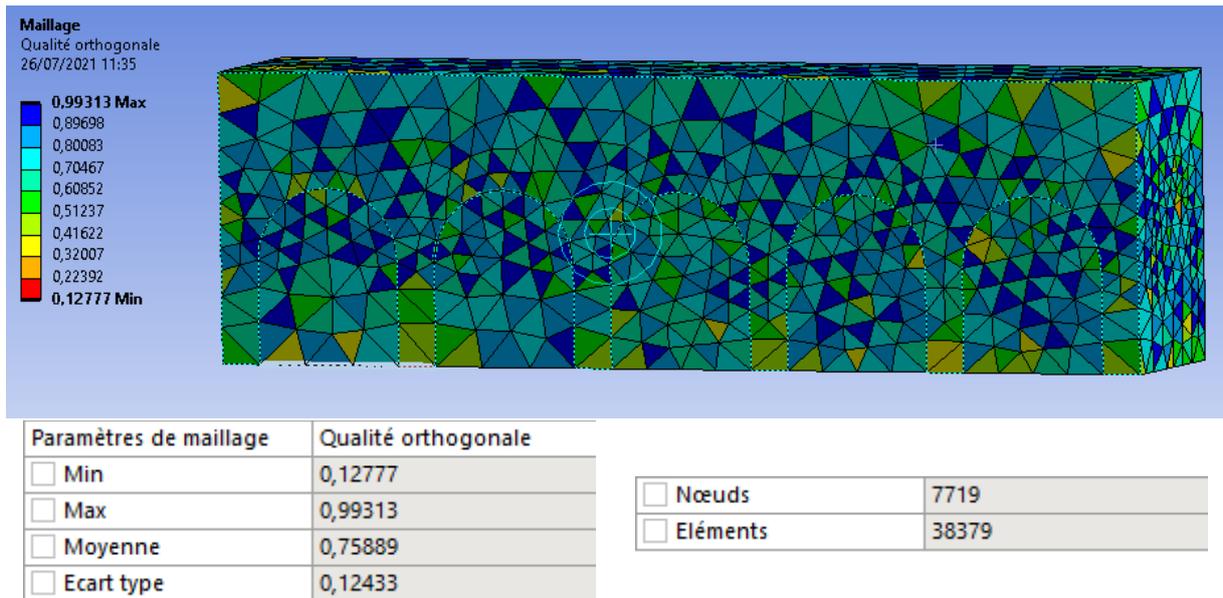


Figure 36 : En haut, la qualité orthogonale locale, en bas, les caractéristiques du maillage

Il est également possible lors dans cette étape de raffiner le maillage dans certaines zones singulières du problème en utilisant la fonction « Inflation ». Ce raffinage n’a pas été réalisé, afin de ne pas alourdir le maillage et par conséquent augmenter le temps de simulation.

Lors de cette étape, on définit également des Sélections nommées, qui seront utilisées dans la phase suivante pour définir des conditions limites particulières. La géométrie a donc été divisée en un volume représentant le fluide, un groupe de faces représentant les entrées d’air dans la galerie – avec des conditions limites de type « velocity-inlet », un groupe de faces représentant les parois de la galerie – avec des conditions limites de type « wall », et enfin un groupe de faces particulier représentant les taches solaires du sol de la galerie – également de type « wall ».

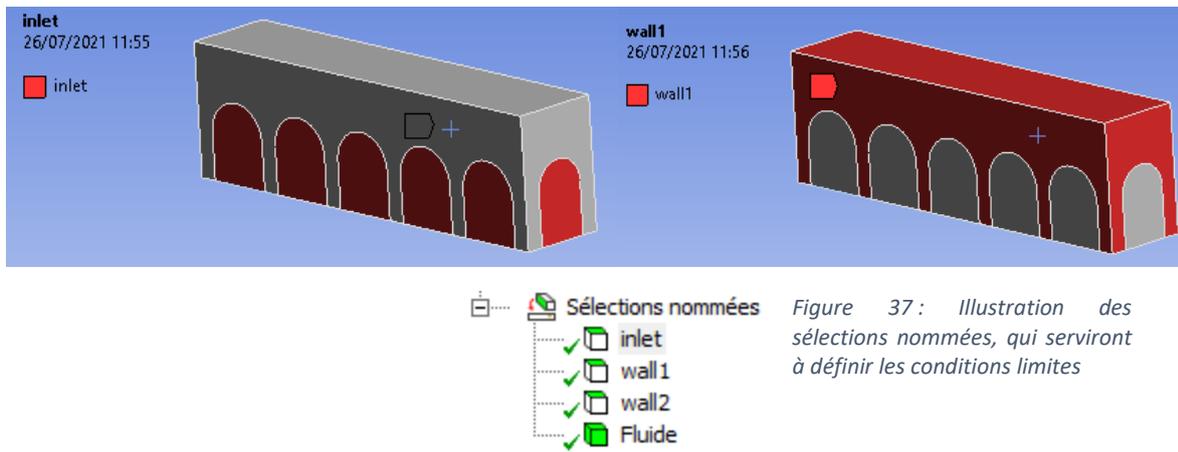


Figure 37 : Illustration des sélections nommées, qui serviront à définir les conditions limites

### 3.3.3. Le paramétrage du domaine

La première étape lorsque l’on procède au paramétrage de la simulation est de choisir les caractéristiques générales de celle-ci. On utilise une résolution basée sur la pression, adapté pour les écoulements lents et incompressibles, ce qui est notre cas ici. On ne tient pas compte de la gravité car

le phénomène est négligeable devant les autres. De la turbulence ayant été mise en évidence dans la partie 3.2.2.3., l'écoulement d'air dans la galerie est fortement instationnaire, on prend en compte l'équation de l'énergie dans le paramétrage, on insère un modèle de viscosité  $k - \epsilon$ , de type Realizable (cf 3.2.2.3.).

Il nous faut ensuite déterminer les caractéristiques des corps mis en jeu. Il a été dit dans la partie 2.1.1. que les parois de la galerie étaient faites de pierre calcaire, les deux corps mis en jeu sont donc l'air et le calcaire. Leurs caractéristiques respectives, paramétrées sur Fluent, sont résumées ci-après.

Air :

<b>Masse volumique <math>\rho</math> (kg.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>1,225</b>
<b>Chaleur spécifique <math>C_p</math> (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	<b>1006,43</b>
<b>Conductivité thermique <math>\lambda</math> (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,0242</b>
<b>Viscosité dynamique <math>\mu</math> (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>1,7894.10<sup>-5</sup></b>
<b>Viscosité cinématique <math>\nu</math> (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>1,4607.10<sup>-5</sup></b>
<b>Coefficient de dilatation thermique <math>\beta</math> (K<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,003</b>

Tableau 3 : Caractéristiques physiques de l'air paramétrées sous Fluent

Calcaire :

<b>Masse volumique <math>\rho</math> (kg.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>2800</b>
<b>Chaleur spécifique <math>C_p</math> (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	<b>856</b>
<b>Conductivité thermique <math>\lambda</math> (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)</b>	<b>2,25</b>
<b>Masse molaire <math>M</math> (kg.kmol<sup>-1</sup>)</b>	<b>100,09</b>

Tableau 4 : Caractéristiques physiques du calcaire paramétrées sous Fluent

Il est possible de caractériser chacun des deux corps précédents par des grandeurs variables, exprimées en fonction d'un ou de plusieurs autres grandeurs, pour plus de précision. Dans notre cas, les approximations de Boussinesq et des gaz parfaits ayant été posées (cf 3.2.2.1. et 3.2.2.2. respectivement) et étant donnée la précision recherchée, des caractéristiques numériques constantes conviendront tout à fait.

Une fois ces caractéristiques intégrées à la simulation, il convient de déterminer les conditions limites du domaine spatial. Elles se décomposent en :

- Inlet : Cette condition permet de modéliser une entrée de fluide dans le domaine spatial, qui peut être de type vitesse ou de type pression. En conséquence, on paramètre à ce moment la vitesse ou la pression d'entrée, ainsi que la température du fluide incident, les éventuels paramètres caractérisant la turbulence, et les coefficients d'échanges radiatifs du corps.
- Outlet : On caractérise de la même manière que les entrées le fluide qui va sortir du domaine spatial.
- Symétrie : Cette condition est utile quand un flux est symétrique par rapport à une paroi, ce qui traduit une condition adiabatique. Il n'y a donc pas de flux à travers ladite paroi, les dérivées partielles sur celle-ci sont donc nulles.

- Murs : Cette condition permet de modéliser une paroi solide, caractérisée par une température de surface, un flux de chaleur qui peut être décomposé en flux conducto-convectif, ou en flux radiatif (cf 3.2.2.2.), ou un mélange des deux. Il est également possible de paramétrer la rugosité de la paroi, ainsi que son épaisseur et le matériau qui la compose.

A l'instar des caractéristiques des fluides, il est possible de paramétrer les conditions aux limites en fonction d'une ou de plusieurs grandeurs caractéristiques des corps.

Pour pouvoir paramétrer notre simulation, on s'appuie sur les valeurs obtenues dans la partie 2, qui présente les expérimentations in situ, et qui nous permettent de déterminer les valeurs. Ainsi, nous aurons un modèle le plus fidèle possible de la réalité, et nous pourrons confronter les résultats de la simulation aux mesures réelles de l'évolution de l'air dans la galerie, qui constitue la seconde partie des mesures réalisées. Les conditions aux limites définies sur Fluent sont recensées ci-après :

Localisation	Type de condition	Grandeur - Unité	Valeur
Arcade d'entrée	Velocity Inlet	Vitesse $v$ ( $m.s^{-1}$ )	0,4 (10h) 0,38 (12h45) 0,39 (15h30)
		Energie cinétique de turbulence $k$ ( $m^2.s^{-2}$ )	$6.10^{-4}$ (10h) $5,4.10^{-4}$ (12h45) $5,7.10^{-4}$ (15h30)
		Taux de dissipation de turbulence $\varepsilon$ ( $m^2.s^{-3}$ )	$3,4.10^{-6}$ (10h) $2,9.10^{-6}$ (12h45) $3,2.10^{-6}$ (15h30)
		Température $T$ ( $^{\circ}C$ )	20 (10h) 22 (12h45) 23,5 (15h30)
Arcades latérales	Velocity Inlet	Vitesse $v$ ( $m.s^{-1}$ )	0,13 (10h) 0,13 (12h45) 0,15 (15h30)
		Energie cinétique de turbulence $k$ ( $m^2.s^{-2}$ )	$6,3.10^{-5}$ (10h) $6,3.10^{-5}$ (12h45) $8,4.10^{-5}$ (15h30)
		Taux de dissipation de turbulence $\varepsilon$ ( $m^2.s^{-3}$ )	$1,2.10^{-7}$ (10h) $1,2.10^{-7}$ (12h45) $1,8.10^{-7}$ (15h30)
		Température $T$ ( $^{\circ}C$ )	20,5 (10h) 22 (12h45) 24,5 (15h30)
Arcades ouvertes sur l'extérieur	Velocity Inlet	Vitesse $v$ ( $m.s^{-1}$ )	0,25 (10h) 0,23 (12h45) 0,24 (15h30)
		Energie cinétique de turbulence $k$ ( $m^2.s^{-2}$ )	$2,3.10^{-4}$ (10h) $2.10^{-4}$ (12h45) $2,2.10^{-4}$ (15h30)
		Taux de dissipation de turbulence $\varepsilon$ ( $m^2.s^{-3}$ )	$8,2.10^{-7}$ (10h) $6,6.10^{-7}$ (12h45)

			7,7.10 <sup>-7</sup> (15h30)
		Température $T$ (°C)	22 (10h) 29,6 (12h45) 29,7 (15h30)
Parois de la galerie	Wall	Température $T$ (°C)	20,4 (10h) 21,4 (12h45) 20,7 (15h30)

Tableau 5 : Récapitulatif des conditions aux limites implémentées sous Fluent

### 3.3.4. Simulation

Afin de lancer la simulation, il faut tout d’abord initialiser le processus, c’est-à-dire implémenter les conditions initiales pour que le solveur Fluent soit en mesure de proposer des solutions fixées aux équations de la dynamique des fluides. Les grandeurs qui doivent être initialisées sont la température  $T$  de l’air, sa vitesse  $v$  dans chacune des directions de l’espace, son énergie cinétique de turbulence  $k$ , son taux de dissipation de turbulence  $\varepsilon$ . Les valeurs d’initialisation sont présentées dans le tableau ci-dessous, pour la simulation de 10h. Afin de faciliter la détermination des vitesses initiales de l’air, il est possible d’appliquer une méthode d’initialisation automatique, qu’il est ensuite possible de modifier selon le cas d’étude.

Température $T$ (K)	294,5
Vitesse $V_x$ selon l’axe $\vec{u}_x$ (m.s <sup>-1</sup> )	0
Vitesse $V_y$ selon l’axe $\vec{u}_y$ (m.s <sup>-1</sup> )	0
Vitesse $V_z$ selon l’axe $\vec{u}_z$ (m.s <sup>-1</sup> )	-0,11
Energie cinétique de turbulence $k$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> )	2,5.10 <sup>-4</sup>
Taux de dissipation de turbulence $\varepsilon$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> )	1.10 <sup>-6</sup>

Tableau 6 : Valeurs initiales implémentées sous Fluent, exemple pour la session de 10h

Une fois l’initialisation réalisée, il faut déterminer la durée de simulation, ainsi que le pas de temps. Comme exposé dans la section 3.3.3., il est nécessaire de simuler en régime transitoire à cause de la présence de la turbulence. On cherche également à atteindre un régime permanent afin d’atteindre un équilibre thermo-aérodynamique au sein de la galerie. Une fois celui-ci atteint, on est en mesure d’analyser l’influence de cet espace – ici de ses caractéristiques géométriques – sur le microclimat généré en son sein. Pour caractériser ce régime permanent, on se base sur les critères de convergence établis automatiquement par le solveur Fluent lui-même, résumés dans le Tableau 2 de la section 3.1.2.

De plus, on va tenir compte pour notre simulation du temps pendant lesquelles les mesures de la partie 2 ont été réalisées. La simulation va donc se dérouler pendant 30 minutes. Toujours dans un souci d’économie de temps étant donné le nombre de simulation à réaliser dans la partie suivante, différents pas de temps ont été testés afin de trouver le meilleur compromis entre précision de la simulation et coût temporel de la simulation. De la même façon que pour la détermination de la taille des éléments du maillage à la section 3.3.2., on obtient un pas de temps optimal de 30 secondes. Avec cela, on arrive à un coût temporel des simulations d’environ 5 minutes, ce qui semble raisonnable au regard du nombre des simulations à mener.

Il est également possible de déterminer le nombre d’itérations par pas de temps réalisées par Fluent, une modification de ce nombre ayant un impact sur la convergence de la solution. Avec le paramétrage

préalable, le nombre d'itération offrant une convergence de la solution pour un coût en temps diminué est de 5 itérations par seconde. L'ensemble du paramétrage temporel est résumé dans la Figure 38.

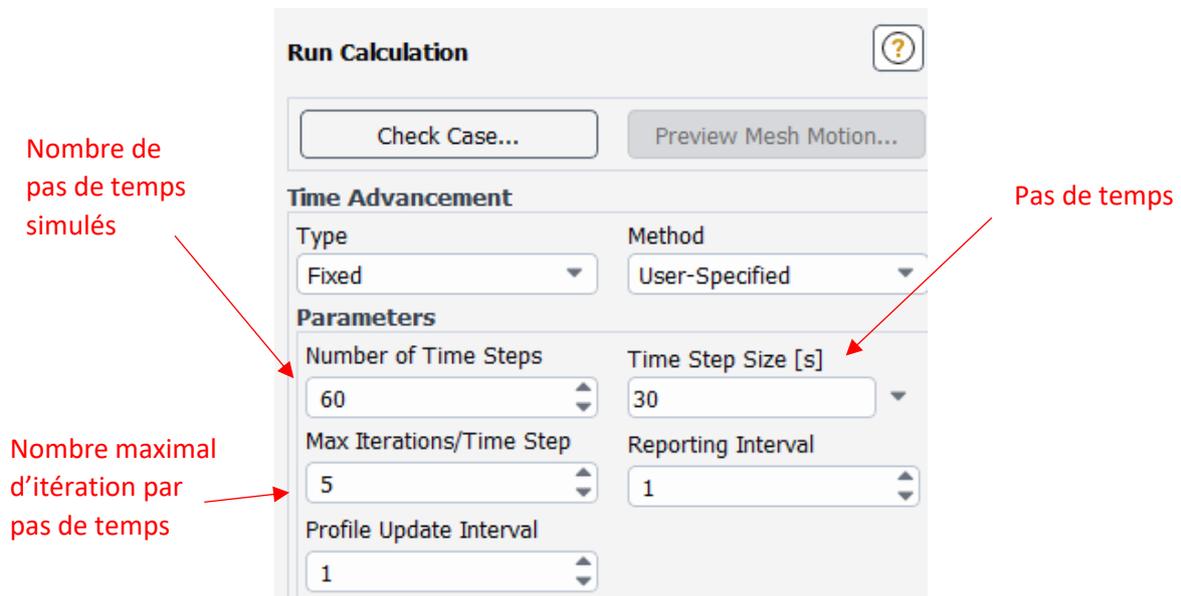


Figure 38 : Choix des paramètres temporels de la simulation

## 4. Résultats – Discussions

Dans cette partie, les résultats de la simulation de référence – qui est la modélisation de la portion de galerie du cloître du musée des Beaux-Arts présentée en partie 2 – seront confrontés aux mesures réalisées dans cette même galerie dans le but de conférer une certaine solidité au modèle construit. Dans un second temps, sera analysée l'impact de la position du Soleil dans le ciel sur le confort, puis sur la base des résultats obtenus, trois paramètres géométriques seront analysés au moment de la journée où le confort sera maximum, afin d'étudier l'impact de ceux-là sur celui-ci. La nomenclature de ces paramètres sera détaillée en annexe.

### 4.1. Confrontation de la simulation aux mesures in situ

#### 4.1.1. Confrontation de la tache solaire réelle à celle calculée

La comparaison de la tache solaire engendrée dans la galerie obtenue par la simulation à la tache solaire réelle ne peut se faire que de façon qualitative grâce aux photographies prises de la tache solaire réelle. De plus, celle-ci ne se distinguait nettement que lors de la session de mesures de 12h45, la couverture nuageuse rendant sa distinction plus difficile lors des deux autres sessions, la comparaison ne peut donc se faire effectivement que sur cette session de 12h45.

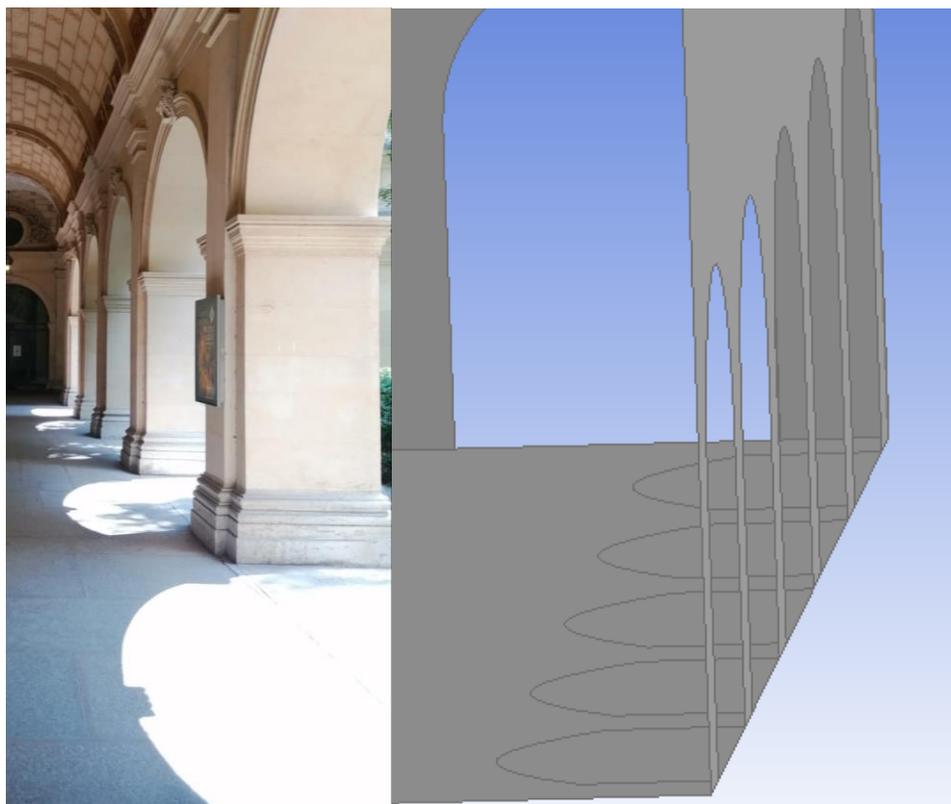


Figure 39 : Comparaison de la tache solaire réelle (à gauche) et calculée (à droite)

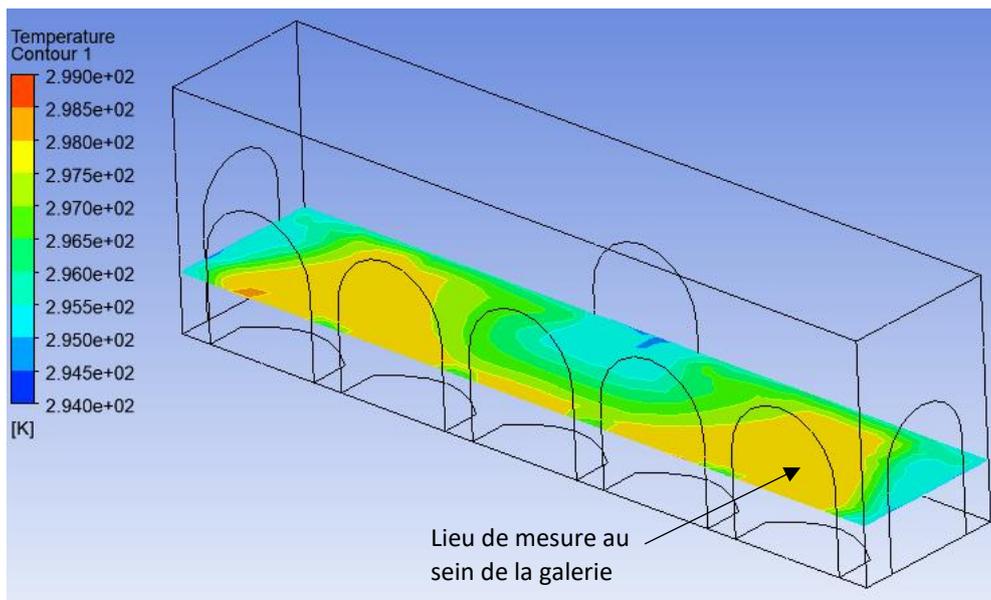
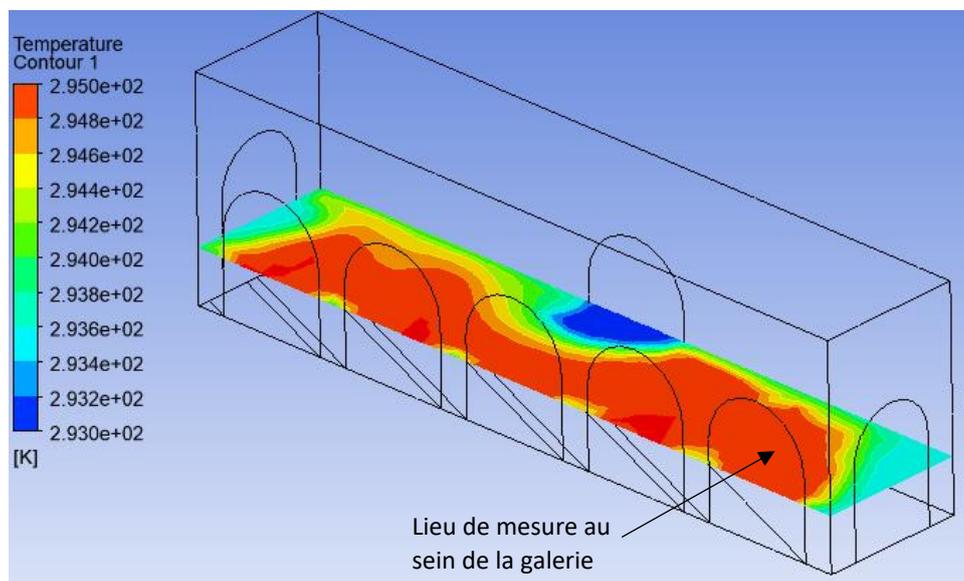
La Figure 39 ne permet pas de comparer avec précision la tache solaire déterminée sur le modèle à la tache solaire réellement engendrée. Cependant, les deux photographies mises côte à côte permettent

d'y déceler une certaine ressemblance, non seulement dans la forme de la tache, mais également dans les dimensions de celle-ci. Qualitativement, la géométrie du modèle semble être validée par la réalité : les taches solaires sont de même forme et de dimensions similaires comparables.

#### 4.1.2. Confrontation de la température au sein de la galerie

La confrontation ici peut se réaliser sur différents plans. D'abord en comparant les températures mesurées et obtenues par simulation, puis en comparant la date de l'équilibre thermique en enregistrant les résultats au fil de la simulation.

Afin de pouvoir comparer les températures ainsi que les différences de température, il faut évaluer les grandeurs à la même hauteur que celle où ont été réalisées les mesures, à savoir à environ 1,5 m de hauteur. Pour cela, il est possible d'obtenir une distribution spatiale des températures sur un plan de 1,5 m de hauteur là au sein de la galerie dans le post-processeur du logiciel Ansys – Fluent.



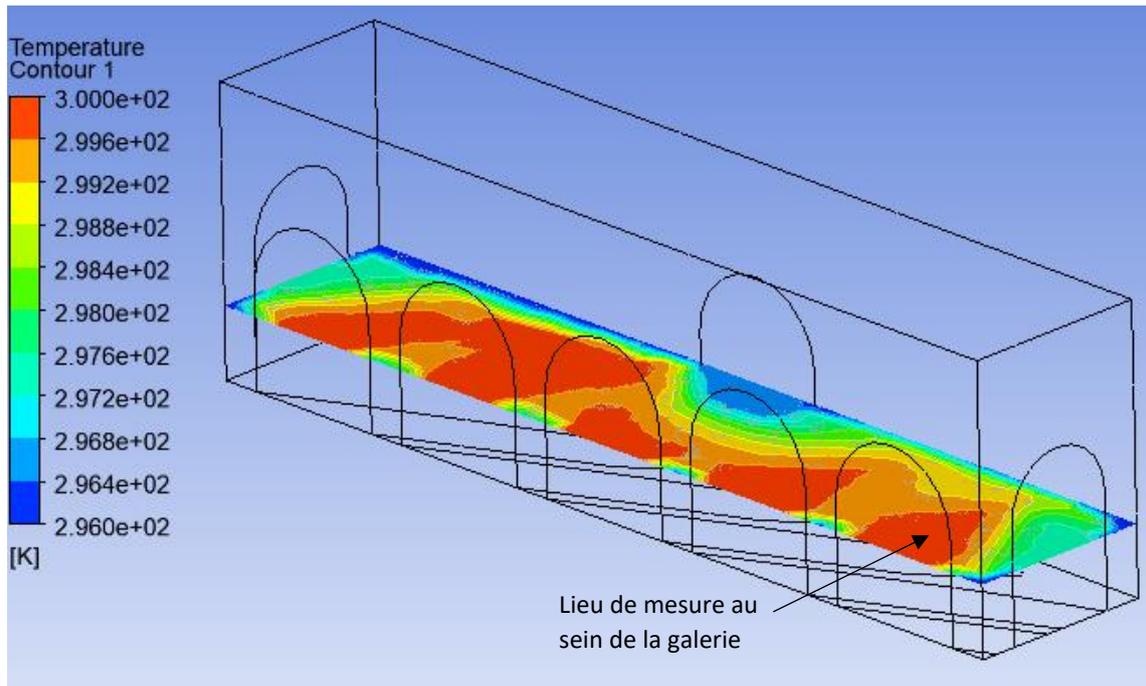


Figure 40 : Distribution spatiale de la température au bout de 30 minutes de simulation. En haut, pour la session de 10h, au milieu pour celle de 12h45 et en bas, pour celle de 15h30

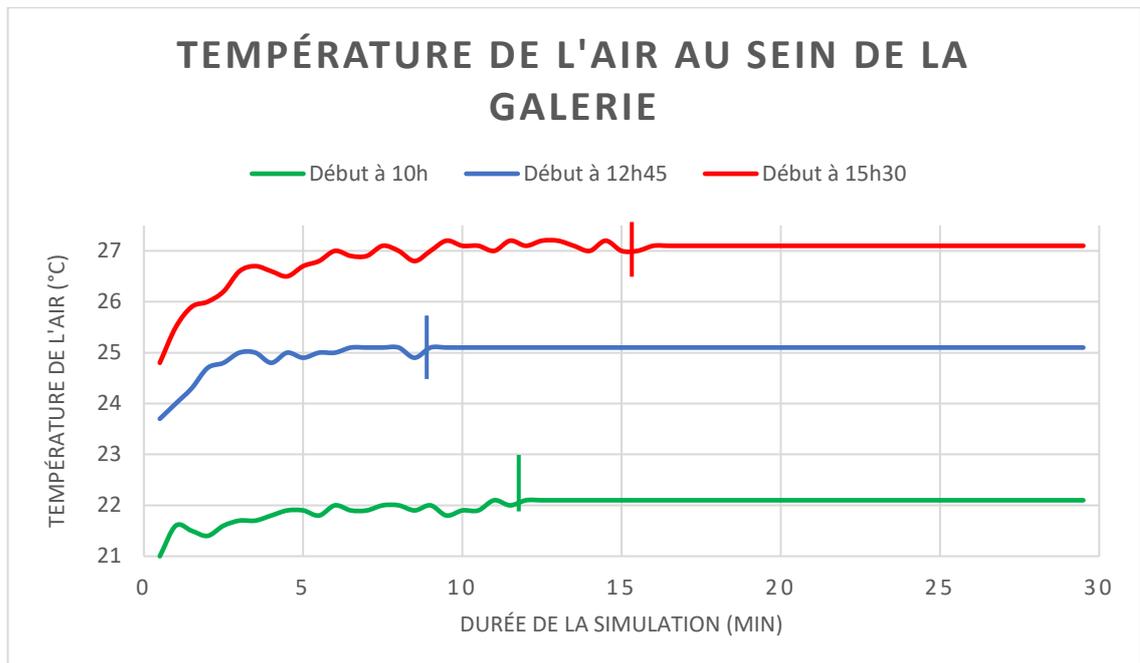
Cette première simulation permet de lire la température finale au sein de la galerie et de comparer cette dernière à la température d'équilibre obtenue par la mesure en partie 2. Nous avons, pour les 3 simulations, les températures finales suivantes.

	Température mesurée au bout de 30 min (°C)	Température simulée au bout de 30 min (°C)
<b>10h</b>	Environ 21,2	Entre 21,8 et 22
<b>12h45</b>	Environ 24	Entre 24,75 et 25
<b>15h30</b>	Environ 26	Entre 26,2 et 27

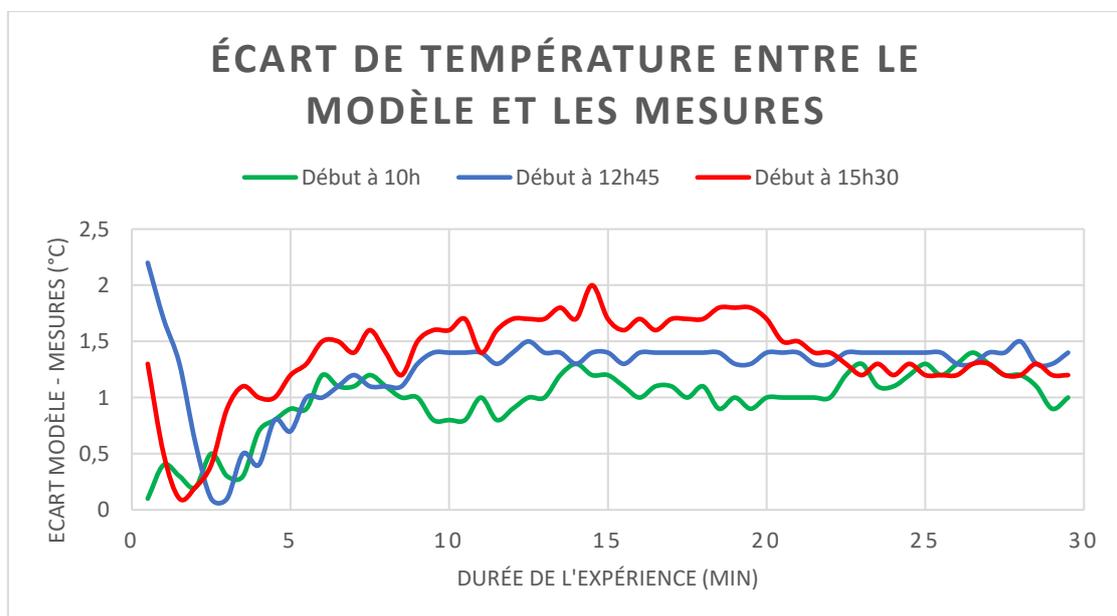
Au regard de cette première confrontation, il semblerait que le modèle soit imprécis, et ne fournisse pas les mêmes valeurs que les mesures pratiquées en partie 2. Afin de confirmer ou d'infirmer cela, il s'agit de comparer maintenant l'évolution de la température tout au long des 30 minutes. Si la courbe de température a la même allure, mais qu'elle est translatée de quelques unités de température, alors nous pourrions considérer que le modèle est fiable dans son comportement, bien que les résultats ne collent pas exactement à la réalité. Ce qui importe ici n'est pas tant les valeurs fournies par les deux méthodes que le comportement du modèle par rapport à la réalité.

Le Graphique 9 ci-dessous montre, de façon similaire à la section 2.5.1., l'évolution de la température au sein de la galerie en fonction du temps, avec les trois simulations superposées sur le même graphique. Ce qu'il importe surtout de regarder ici, c'est le comportement asymptotique des graphiques réel et simulé, car c'est cela qui pourra déterminer si le modèle se comporte ou non de façon similaire à la réalité. En effet, le début des simulations et mesures peut être perturbé par différents facteurs, comme la stabilisation dans le cas des appareils dans le cas des mesures, ou bien

l'atteinte d'une convergence définie par les critères des résidus dans le cas de la simulation (cf Tableau 2). La date d'atteinte de l'équilibre thermique dépend des facteurs mentionnés précédemment, d'où un décalage entre les dates d'équilibre pour les simulations et pour les mesures.



Graphique 9 : Evolution de la température de l'air en fonction du temps à l'intérieur de la galerie. Les trois simulations sont superposées



Graphique 10 : Écart de température en valeur absolue entre le modèle et les mesures pour la température de la galerie

En considérant ce qui a été dit précédemment, et en comparant les deux graphiques (Graphique 6 et Graphique 9), nous pouvons accorder une certaine validité au modèle, celui-ci se comportant asymptotiquement de la même façon que dans la réalité. Les deux graphiques présentent

des régimes transitoires différents – augmentation de la température dans les trois cas simulés, diminution ou stagnation de celle-ci dans les trois sessions de mesures – mais ils aboutissent tous deux à des équilibres thermiques à des dates similaires (les barres verticales sur le graphique) pour les trois moments de la journée étudiés. Il convient maintenant de mettre en exergue l'écart de température entre le modèle et la mesure afin de pouvoir évaluer la fidélité du modèle vis-à-vis de la réalité.

Le Graphique 10 montre des écarts de températures qui varient rapidement au début de chaque période de 30 minutes, ce qui correspond aux régimes transitoires respectifs des trois simulations et des trois sessions de mesures. Ici aussi, on remarque un comportement asymptotique similaire pour les écarts de températures entre les trois sessions d'expérimentation (10h, 12h45 et 15h30). Les valeurs asymptotiques des écarts de températures affichent des valeurs à peu près constantes – au regard des températures intrinsèques mesurées et simulées – à partir de  $t = 10 \text{ minutes}$  environ, avec des valeurs asymptotiques d'environ  $1,5 \text{ °C}$  plus faibles pour les trois sessions d'expérimentations par rapport aux trois simulations. Ce graphique nous montre ainsi que le modèle présente quelques imprécisions, sa fidélité n'est pas totale par rapport à la réalité.

Cela peut s'expliquer par les hypothèses simplificatrices posées dans la partie 2 concernant les mesures, ainsi que dans la partie 3 lors de la construction du modèle, où certains détails architecturaux ont été négligés dans la géométrie, l'objectif étant d'analyser globalement le comportement du modèle. D'autres pistes explicatives peuvent être invoquées pour expliquer ces écarts dans la campagne de mesures – notamment l'imprécision des appareils de mesures, ainsi que les erreurs de l'expérimentateur – mais également dans les simulations – par exemple les modèles pris en compte, la modélisation des taches solaires de façon géométrique ou encore la modélisation des ouvertures latérales de notre portion de galerie.

Considérant les objectifs de la simulation – qui est de modéliser le comportement asymptotique de la galerie du point de vue du microclimat, nous pouvons postuler une certaine solidité du modèle après avoir éprouvé ce dernier. Bien que la fidélité des températures ne soit pas absolue, le modèle sera néanmoins exploitable pour analyser l'influence de certains paramètres de conception sur le microclimat au sein de cet espace.

#### **4.1.3. Confrontation de la vitesse de l'air**

L'objectif de cette section est de comparer l'ordre de grandeur des vitesses d'air mesurées et simulées au sein de la galerie. Comme mis en exergue dans la section 2.5.2., le champ des vitesses d'air mesuré est extrêmement chaotique, donc inexploitable, d'où cette recherche d'ordre de grandeur des valeurs mesurées. Le traitement des résultats des simulations sur le post-processeur a permis de voir que le régime de vitesse d'air atteint un régime permanent quasi-instantanément, ce qui est logique puisque les vitesses d'air pénétrant la galerie ont été considérées comme constantes dans les conditions limites (cf section 3.3.3.).

La Figure 41 ci-dessous montre les lignes de courant de l'air dans la galerie pour les trois simulations – 10h, 12h45 et 15h30. Cette figure met également en évidence un régime chaotique d'écoulement, mais il est néanmoins possible de lire des valeurs de vitesse de l'air grâce à la légende.

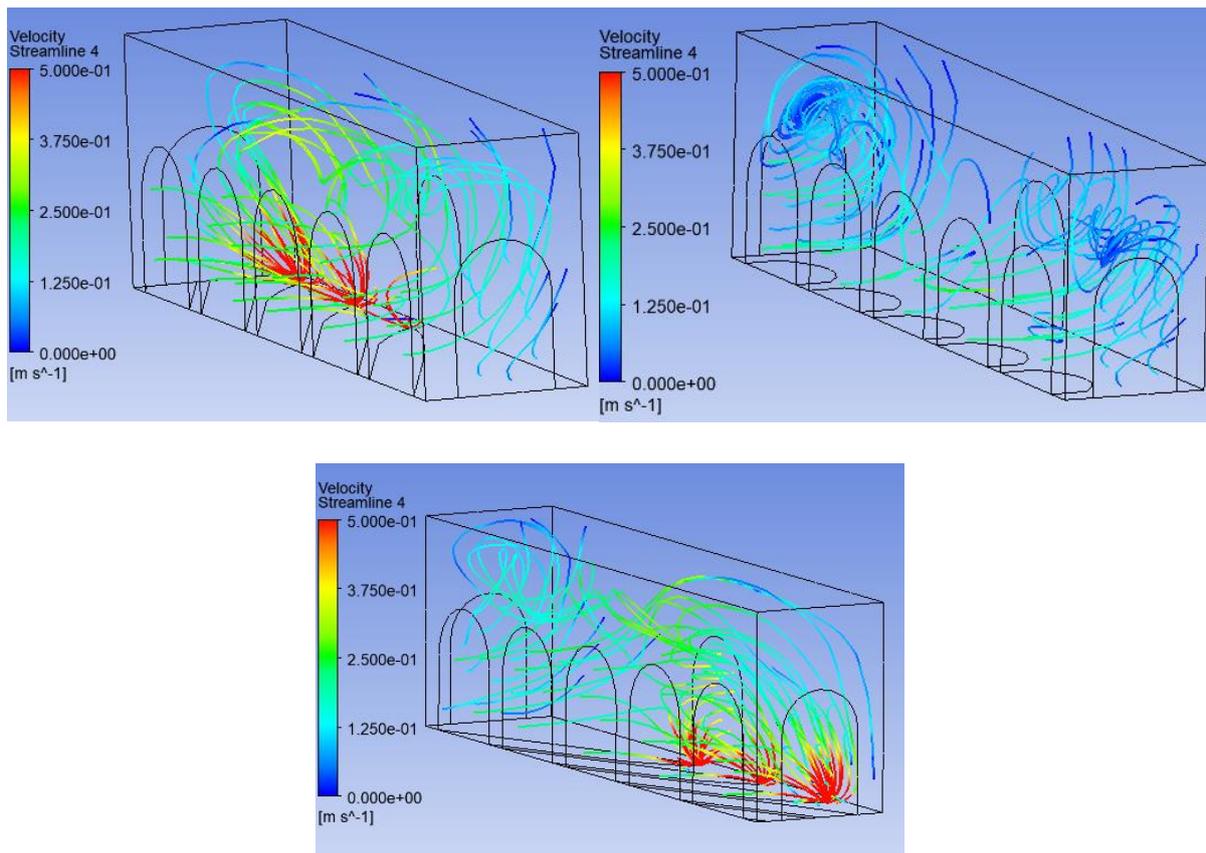


Figure 41 : Lignes de courant de l'air à l'issue des 30 minutes de simulation. En haut à gauche, pour la session de 10h, en haut à droite pour celle de 12h45 et en bas, pour celle de 15h30

La Figure 41 affiche néanmoins des résultats surprenant concernant les simulations de 10h et 15h30, puisqu'au sommet de la tache solaire de la galerie, les vitesses d'air tendaient vers l'infini. Nous avons ici un défaut du modèle, qui fausse les résultats de la vitesse de l'air au voisinage de ces lieux, les valeurs de vitesse ne peuvent donc pas être exploitées à proximité de ces singularités. Cependant, en se plaçant « loin » de ces points singuliers, les valeurs de vitesses semblent plus cohérentes et fidèles à la réalité.

Ainsi, sur les trois simulations réalisées, les valeurs de vitesse d'écoulement de l'air oscillent entre 0,1 et 0,25  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  environ – la lecture se fait grossièrement grâce à la légende, des ordres de grandeur qui sont en accord avec les résultats mesurés exposés en section 2.5.2. De ces résultats, il est difficile d'accorder du crédit supplémentaire au modèle concernant les deux simulations de 10h et de 15h30 du fait des singularités relevées aux sommets des taches solaires. La session de 12h45 ne semble pas présenter les mêmes singularités, ce qui pourrait laisser supposer que le modèle n'est pas faussé pour cette simulation. Pour palier tout problème, il faudrait pouvoir supprimer ces taches de la géométrie et implémenter directement sous Fluent la course du Soleil ainsi que le rayonnement qu'il apporterait dans la galerie.

Cependant, « loin » de ces singularités, ce qui est plus facilement lisible dans la simulation de 12h45, les ordres de grandeur de vitesse d'air sont en accord avec celles mesurées en partie 2, ce qui exclue

une remise en cause totale du modèle, et ce qui peut lui accorder un léger crédit supplémentaire si l'on tient compte de la simulation de 12h45.

## **4.2. Analyse du confort au sein de la galerie**

### **4.2.1. Paramètres déterminant le confort**

Il est nécessaire de poser des critères d'évaluation du microclimat afin de pouvoir évaluer quelle configuration offre le potentiel de confort le plus important en période de canicule.

La température au sein de la galerie semble être un critère assez important a priori. Cependant, une température au sein d'un espace ne peut constituer un critère fiable que relativement à une autre température, comme la température extérieure à cet espace par exemple. Ainsi, l'un des critères importants pour pouvoir évaluer le potentiel de confort au sein d'un espace serait la différence de température entre l'extérieur – modélisée ici par la température entrant par l'arcade extérieure, la plus représentative de la température de l'air extérieur – et l'intérieur de la galerie.

Cette dernière présentant des variations spatiales (cf Figure 40), il est difficile de prendre une seule valeur qui soit représentative de la galerie. Ce qui nous semble ici judicieux est de se placer dans la condition la plus défavorable au milieu de la galerie – c'est-à-dire à la moitié de la profondeur de la galerie, et de prendre comme température intérieure de la galerie la valeur maximum, toujours à une hauteur de 1,5 m, qui est représentatif de la hauteur d'un usager de cet espace. Il est également possible, en complément de ce rendu visuel, d'obtenir une distribution en trois dimensions de la température, avec des dégradés de transparence à mesure que diminue la température.

D'autres critères plus secondaires pourraient également venir compléter cette évaluation du potentiel de confort thermique comme la date d'équilibre thermique déjà mentionnée dans les parties précédentes, ou bien encore le gradient spatial de température dans toute la galerie, et non plus seulement sur un plan horizontal situé à 1,5 m de hauteur. La date d'équilibre thermique ne sera pas retenue, le gradient spatial viendra lui en complément de rendu visuel.

Pour la suite, il sera supposé que le modèle soit suffisamment fidèle à la réalité pour pouvoir considérer les résultats comme satisfaisant et permettant de prévoir comment concevoir un tel espace.

### **4.2.2. Rôle de la position du Soleil sur le confort**

Les heures des trois sessions de mesures ont été choisies de façon à expérimenter et simuler avec trois positions représentatives du Soleil dans le ciel au cours de la journée (cf section 2.2.). Il est ainsi possible d'analyser l'influence de sa position dans le ciel sur le potentiel de confort thermique dans la galerie. Comme évoqué dans la section précédente, la température extérieure sera modélisée par la température de l'air entrant au niveau de l'arcade extérieure, considérée comme constante. Cela suppose un ciel parfaitement dégagé de tout nuage, et un ensoleillement maximal en période estivale.

Pour la session de 10h, un ciel parfaitement dégagé engendre une température au niveau de l'arcade d'environ 24,5 °C d'après des relevés réalisés lors de la campagne de mesures pendant une période de 4 minutes d'absence de nuage. Les mêmes relevés ont été fait pour les sessions de 12h45 et 15h30 afin de pouvoir insérer une nouvelle condition limite lors d'une météo parfaitement dégagée. On

obtient une température incidente de 35 °C pour la simulation de 12h45 et de 32 °C pour celle de 15h30.

Afin d'étudier le rôle de la position du Soleil, il faut donc relancer les simulations avec une nouvelle condition à la limite du domaine – ici l'arcade ouverte sur l'extérieure.

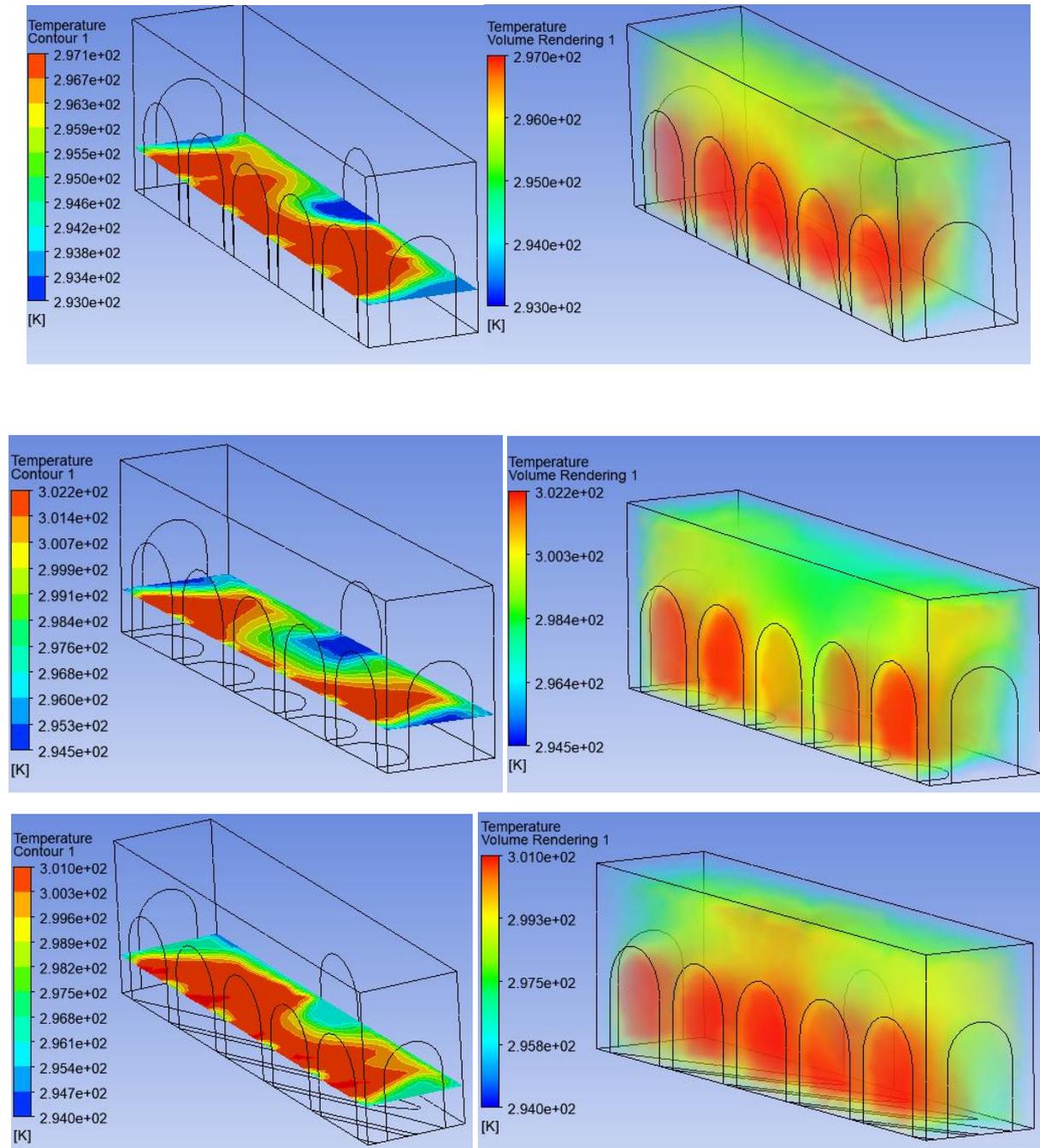


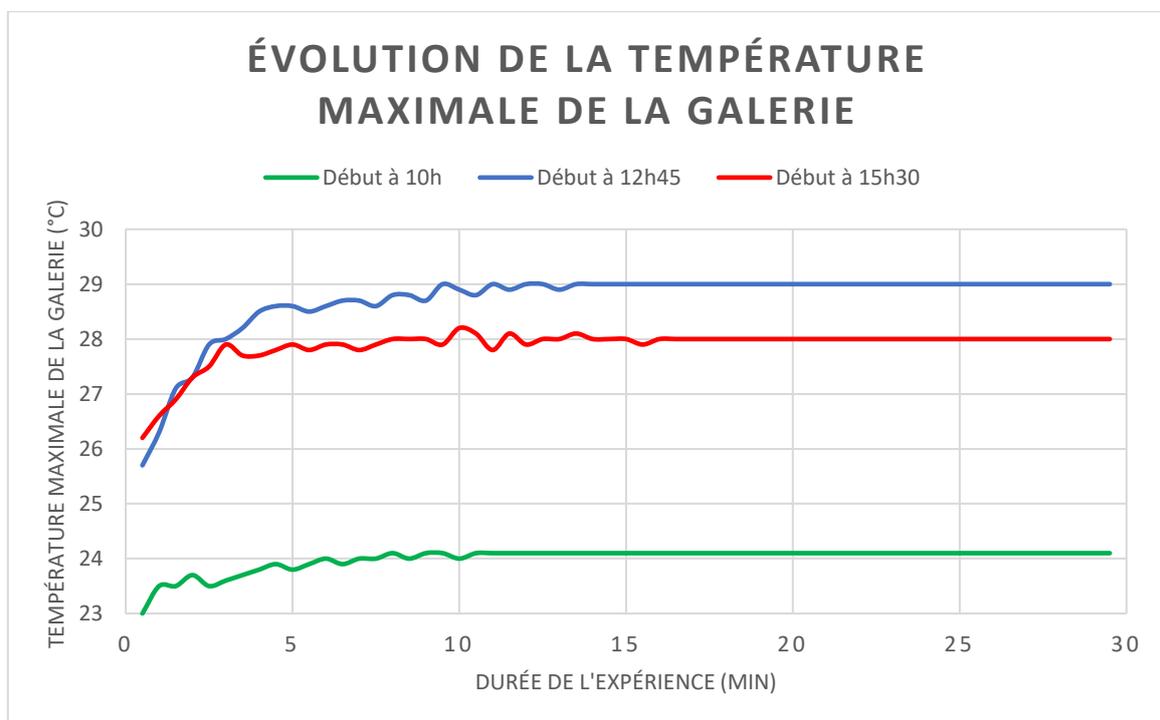
Figure 42 : Distribution spatiale de température sur un plan horizontal situé à 1,5 m de haut pour la partie gauche, dans tout l'espace sur la partie droite. En haut la session de 10, au milieu celle de 12h45 et en bas celle de 15h30

La Figure 42 affiche la distribution spatiale des températures sur le plan ZX<sup>2</sup> situé à 1,5 m de hauteur ainsi que dans toute la galerie, à la fin des simulations, ce sont donc les résultats asymptotiques qui sont affichés ici. Il est intéressant ici de constater que quelle que soit la position du Soleil dans le ciel, la distribution spatiale de température reste globalement la même, et que les gradients de celle-ci sont à peu près dans la même direction entre les trois simulations, bien que leur amplitude varie.

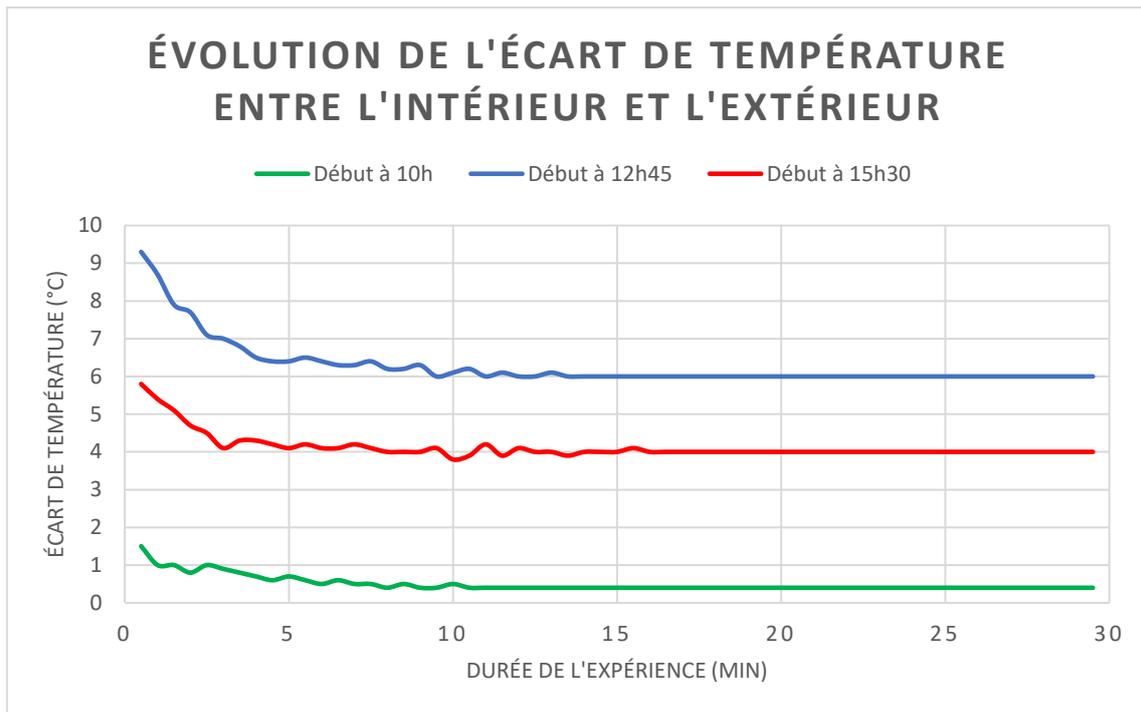
Grâce au post-processeur, il est possible de déterminer la valeur maximale d'une grandeur – ici la température – sur une droite d'un plan en utilisant un tableur. Grâce à ceci, il a été possible de tracer successivement la température intérieure à la galerie puis la différence de température entre l'extérieur (considérée comme constante dans la section précédente) et l'intérieur de la galerie, déterminée dans le post-processeur. Les résultats sont exposés ci-après dans le Graphique 11.

On constate rapidement ici que le critère de température intérieure de la galerie prise indépendamment du reste n'était pas pertinent. En effet, ayant considéré ceci, c'est pendant la matinée que la galerie présenterait le meilleur potentiel de confort thermique, suivi de l'après-midi et enfin de midi. Or, en traçant l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur, le constat est tout autre, puisque le potentiel devient maximal au zénith du Soleil, suivi par l'après-midi, et enfin par la matinée.

Ce critère semble d'autant plus pertinent du point de vue physiologique et même psychologique, car évoluant en extérieur sous une forte température, l'utilisateur d'un espace semi-ouvert comme la galerie aura en mémoire ces conditions météorologiques extérieures. De ce fait, il sera sensible à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et non à la température intérieure prise indépendamment.



<sup>2</sup> Voir en annexe pour la formalisation des plans de coupe



Graphique 11 : Température maximale de la galerie – Ecart de température entre l'extérieur et la valeur maximale dans la galerie

C'est donc ici pendant le zénith du Soleil (12h45) que le potentiel de confort thermique est le plus important, un résultat qui était déjà pressenti lors de la campagne de mesures (partie 2) et qui est confirmé par la simulation.

Pour la suite, nous nous baserons uniquement sur cette session de 12h45 – correspondant au zénith du Soleil (cf Graphique 2) – puisque c'est pendant cette période que le microclimat au sein de la galerie offre le meilleur potentiel de confort thermique, et que l'objectif de cette étude est de proposer des lieux confortables lors de conditions météorologiques caniculaires.

### 4.3. Influence de conception géométrique

Ayant étudié brièvement le rôle que jouait la position du Soleil dans le ciel sur le microclimat généré dans la galerie et son potentiel de confort thermique, il en résulte que la période de la journée présentant le plus grand potentiel de confort est le zénith du Soleil – dans des conditions météorologiques parfaites, c'est-à-dire sans aucune couverture nuageuse de façon à avoir un rayonnement direct maximal incident dans la galerie. Pour la suite, nous nous baserons sur cette période et étudierons différentes configurations de galeries et leur influence sur le microclimat.

#### 4.3.1. Présence d'ouvertures latérales et/ou d'entrée

Lors de la typologie des espaces réalisée en section 1.1., différentes configurations de galeries ont été mises en évidence, certaines différentes de la galerie du musée des Beaux-Arts. Par exemple, certaines galeries ne présentent pas d'ouvertures latérales mais bien une ouverture sur le côté a priori fermé, ou bien à l'inverse, elles ne présentent pas d'ouvertures de type « entrée » comme au musée

mais bien des ouvertures latérales, ou bien encore, aucune ouverture autre que celles présentées du côté ouvert sur l'extérieur. Toutes ces configurations seront simulées et comparées entre elles, avec les mêmes conditions aux limites que dans la section 4.2.2., qui sont représentatives d'une journée de canicule en période d'été, des conditions qui sont recherchées dans l'ensemble de cette étude.

Le début de la partie 4 a mis en évidence l'atteinte d'un équilibre thermique très rapidement dans les simulations. De ce fait, en utilisant les mêmes rendus visuels que précédemment – un graphique présentant l'évolution temporelle des températures et des distributions spatiales de celles-ci sur un plan horizontal de 1,5 m de haut à mi-profondeur – il sera possible de comparer précisément les configurations entre elles. Il n'y a pas ici besoin d'analyser l'écart de température entre l'intérieur de la galerie et l'extérieur, l'analyse de la température en elle-même suffira car la température extérieure restera constante et identique entre les quatre simulations. Les résultats sont illustrés ci-dessous.

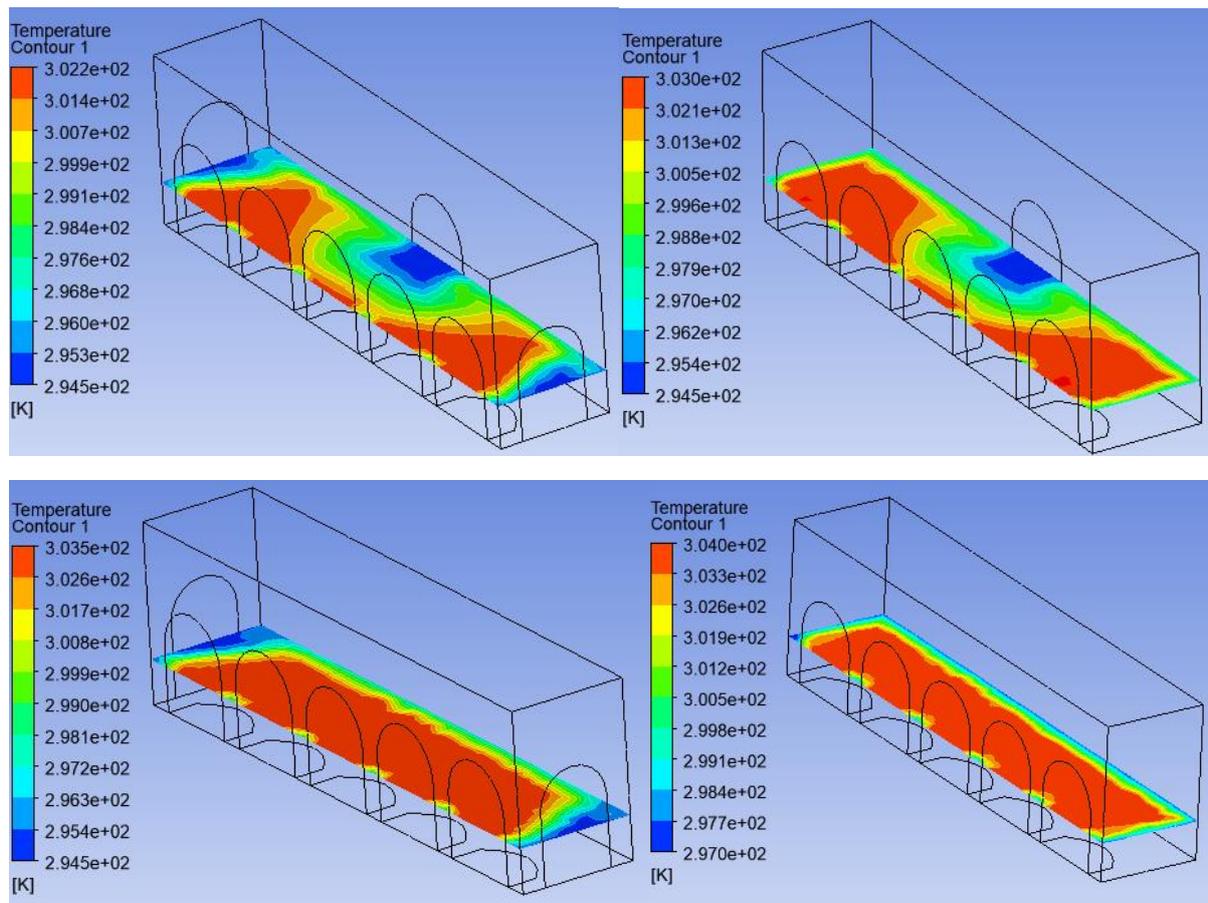
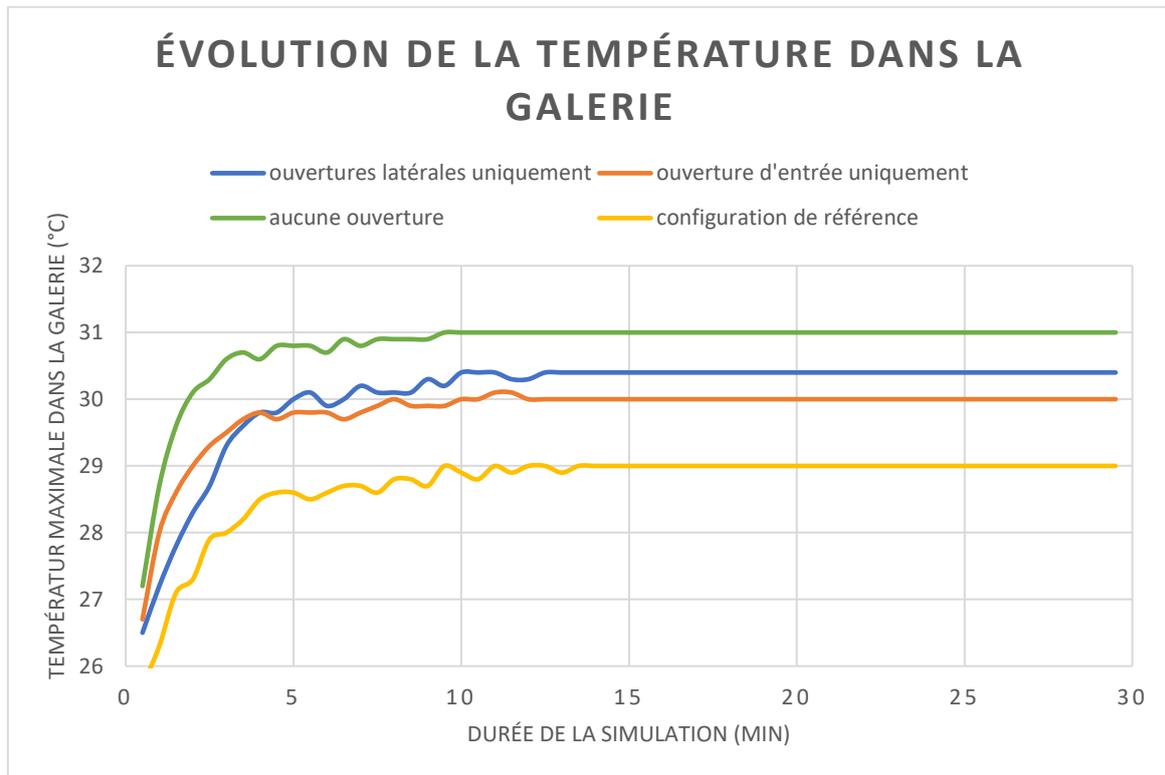


Figure 43 : Distribution spatiale de la température sur un plan horizontal situé à 1,5 m de hauteur au bout de 30 minutes. En haut à gauche, la configuration de référence, en haut à droite, sans ouvertures latérales, en bas à gauche sans ouverture d'entrée, en bas à droite seulement avec les arcades ouvertes sur l'extérieur

La Figure 43 et le Graphique 12 sont instructifs pour plusieurs raisons. Pour rappel, les simulations ont été réalisées pour une température extérieure de 35 °C, implémentée dans la condition limite de vitesse d'air au niveau de l'arcade ouverte sur l'extérieure. Tout d'abord, ce graphique permet de voir là encore que les quatre configurations entraînent des comportements asymptotiques quasiment identiques, mais que les courbes de température sont simplement

translatées en fonction de la configuration étudiée. L'équilibre thermique est par ailleurs atteint rapidement pour chaque simulation, avec des dates comparables (environ 12 minutes).



Graphique 12 : Evolution de la température maximale de la galerie en fonction du temps pour des conditions limites identiques. Les quatre configurations sont superposées sur le même graphique

L'évolution de la température maximale de la galerie au cours du temps montre des potentiels de confort thermique différents en fonction de la configuration simulée. Par ordre de potentiel de confort, nous retrouvons d'abord la configuration de référence, suivie de celle comprenant uniquement une ouverture d'entrée à l'opposé des ouvertures sur l'extérieure, puis vient celle comprenant uniquement les arcades latérales, et enfin, celles sans aucune ouverture autre que celles ouvertes sur l'extérieur. Entre toutes ces configurations, l'écart de température maximale au sein de la galerie est de quasiment 2 °C à l'issue de la simulation, ce qui représente un écart considérable pour des seules différences de configuration de la galerie.

Bien que les configurations avec seulement des ouvertures latérales et avec seulement une ouverture d'entrée en plus des ouvertures sur l'extérieur présentent des courbes de température très proches l'une de l'autre, la configuration sans aucune ouverture supplémentaire affiche une température d'environ 0,6 °C plus élevée, tandis que la configuration de référence affiche une température asymptotique d'1 °C plus faible, d'où un potentiel de confort thermique considérablement plus important pour de telles conditions caniculaires.

Il est également intéressant de constater sur la Figure 43 que la configuration joue sur la distribution spatiale des températures au sein de la galerie, et que l'absence d'ouverture d'entrée tend à uniformiser la température intérieure, tandis que sa présence engendre des gradients non négligeables. La présence d'un tel élément va donc créer au sein de la galerie des endroits plus

confortables que d'autres, avec des températures parfois bien en deçà de la température maximale relevée sur le Graphique 12. Cette ouverture d'entrée du côté opposé aux ouvertures extérieures va donc générer un potentiel de confort supplémentaire par l'apport de zone plus fraîches. Dans les deux configurations qui comportent cet élément, la configuration de référence reste néanmoins celle qui offre le potentiel de confort le plus important.

Pour la suite, nous retiendrons donc la configuration de référence comme étant la plus confortable pour des périodes caniculaires, et nous nous en servirons comme base pour faire varier d'autres paramètres géométriques afin d'étudier leur influence.

#### 4.3.2. Impact de la longueur

La méthode d'analyse du paramètre de la longueur sera identique à celles employées pour le rôle de la position du Soleil dans le ciel ou bien de la configuration de la galerie. Des galeries de longueurs différentes ont été simulées afin d'étudier l'impact de ce paramètre. Afin d'ancrer l'étude dans la réalité, il a été décidé de faire varier le nombre d'arcades ouvertes sur l'extérieur, le pas de longueur est donc grand (3,8 mètres). Cela semble être pertinent au regard des galeries réelles, qui présentent souvent d'importantes dimensions. Les différentes longueurs simulées sont répertoriées dans le tableau suivant. Afin de simuler un réchauffement climatique futur, le choix a été fait de réaliser les simulations sous des conditions météorologiques extérieures – implémentées comme condition limite sur les arcades ouvertes sur l'extérieur – de canicule, c'est-à-dire avec une température de l'air de 45 °C au Soleil.

Nombre d'arcades extérieures	Longueur de la galerie (m)
3	12,2
4	16
5	19,8
6	23,6
7	27,4
8	31,2
9	35
10	38,8

Il est possible de poser quelques hypothèses sur ce que l'on s'attend à obtenir à l'issue des simulations. Dans le cas du paramètre longueur, il peut paraître difficile de s'attendre à une évolution de la température maximale intérieure à la galerie en fonction du nombre d'arcades – que ce soit une diminution, une augmentation ou une quelconque autre évolution – étant donné que celle-ci implique toujours une entrée d'air chaud. Ainsi, pour une galerie qui serait faite de 4 arcades, on pourrait s'attendre au même résultat que si on avait concaténé une galerie de 3 arcades et une galerie d'une seule arcade, c'est-à-dire à une température qui ne changerait pas réellement au sein de la galerie. De la même façon pour les galeries avec un nombre supérieur d'arcades, la longueur ne changerait pas le microclimat étant donné qu'une longueur plus importante impliquerait de nouvelle(s) entrée(s) d'air chaud. Pour les mêmes raisons, il semble peu probable a priori que les gradients de température diffèrent en fonction de la longueur. Le Graphique 13 et la Figure 44 ci-après vont permettre de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

La droite sur laquelle est lue la température maximale est tracée pour chaque rendu visuel. La même légende est identique pour l'ensemble des rendus, visible sur le premier.

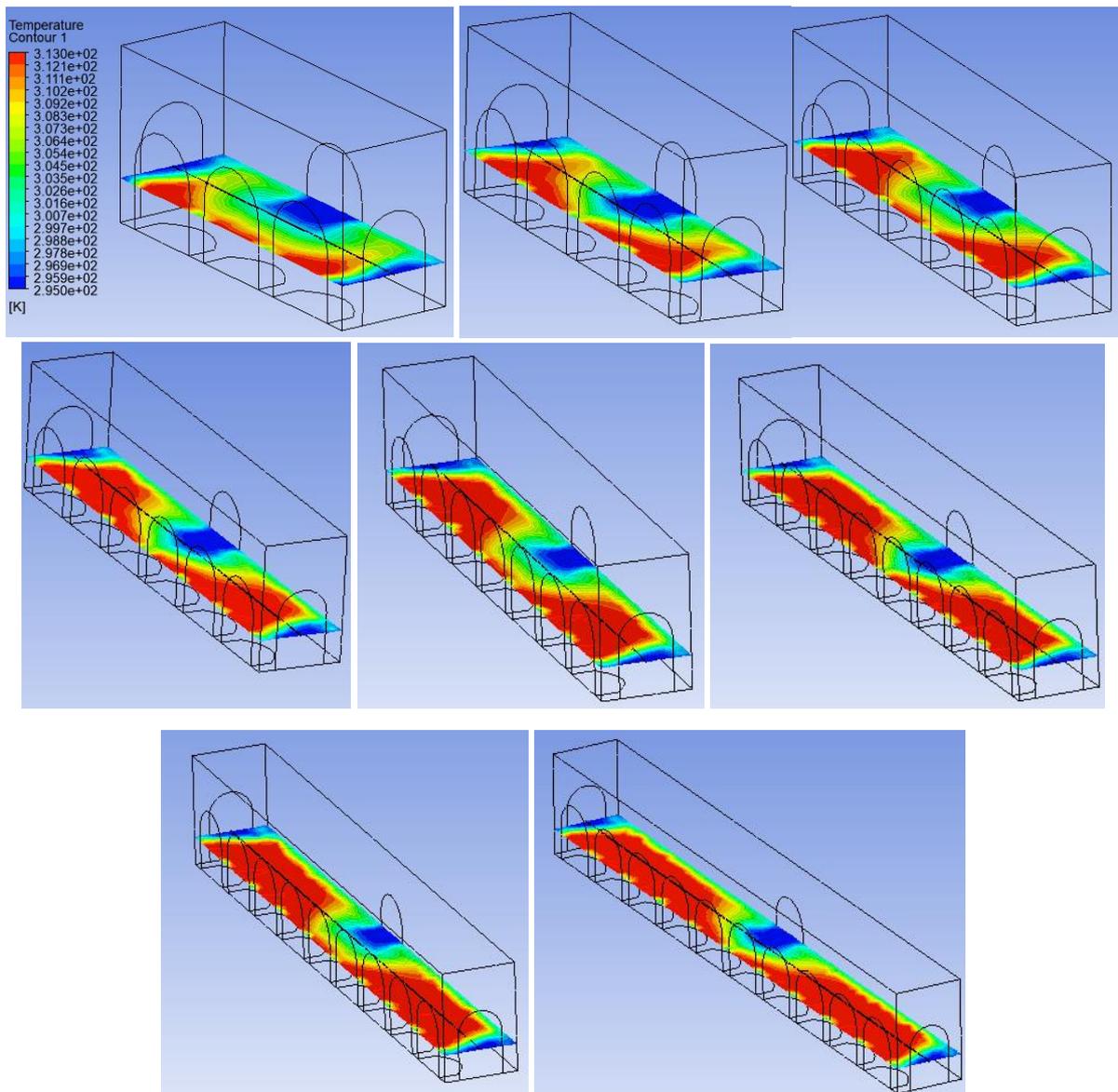
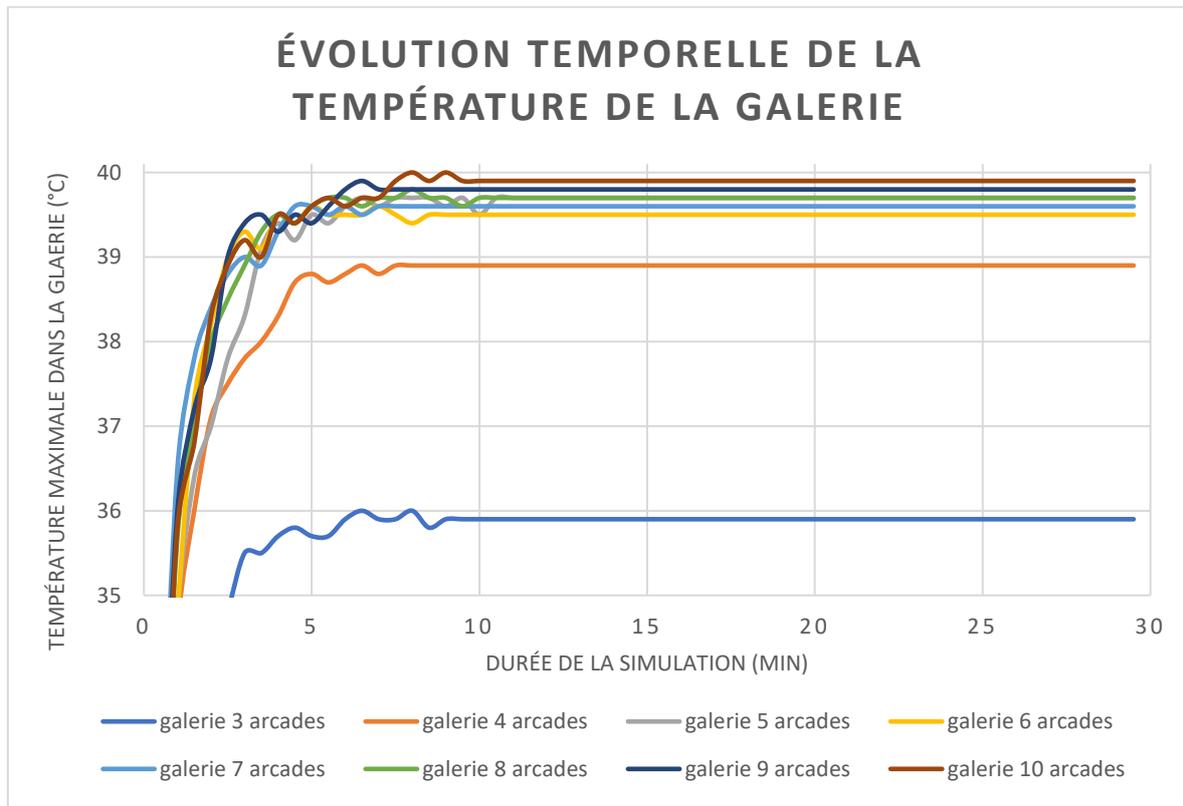


Figure 44 : Distribution planaire de la température en fonction de la longueur de la galerie par nombre d'arcades croissant. Résultats à l'issue de la simulation

La construction du Graphique 13 semble montrer que la longueur a finalement un impact sur le confort au sein de la galerie. En effet, il semblerait que plus la longueur de la galerie augmente, moins celle-ci est confortable, jusqu'à une certaine limite de longueur, qui serait ici de 5 arcades. En d'autres termes, en deçà de 5 arcades – de largeur choisie préalablement dans les sections précédentes – la longueur aurait un impact, significatif qui plus est, car après l'équilibre thermique atteint, on constate jusqu'à 3,5 °C d'écart de température maximale entre la galerie de 3 arcades (12,2 mètres de long) et la galerie de 5 arcades (19,8 mètres de long). Au-delà d'une longueur de 5 arcades, la longueur n'aurait plus d'impact car les comportements asymptotiques de toutes les galeries ayant

une longueur supérieure ou égale à 19,8 mètres sont identiques, à trois dixièmes de degrés Celsius près.



Graphique 13 : Impact de la longueur de la galerie sur sa température maximale intérieure. Les 8 cas d'études sont superposés sur le même graphique

Afin d'analyser plus profondément ce dernier résultat, il convient de s'intéresser à la Figure 44, qui affiche la distribution spatiale asymptotique des températures sur un plan  $ZX^3$  de 1,5 mètres de haut de chaque galerie. Plus précisément, il est nécessaire de s'intéresser aux deux galeries qui semblent faire pencher le résultat vers un impact significatif de la longueur sur le confort intérieur. Or, ces deux galeries semblent être plus confortables grâce à l'arcade d'entrée – et dans une moindre mesure, des arcades latérales, qui est le siège d'une entrée d'air plus frais avec une vitesse plus importante que les arcades extérieures. Ainsi, une fois l'équilibre atteint, la contribution de cette arcade d'entrée sur le confort de la galerie est plus importante que celles des arcades extérieures, c'est-à-dire que l'air chaud entrant par les arcades extérieures et repoussé par l'air frais entrant par l'arcade d'entrée, jusqu'à l'atteinte de l'équilibre présent sur la Figure 44.

Ce résultat, ne s'illustrant que sur les galeries de 3 et 4 arcades, peut s'expliquer simplement. La largeur de l'arcade d'entrée est importante relativement à la longueur totale de la galerie, ces galeries présentent donc moins d'entrées d'air chaud que les galeries plus longues. Plus la longueur de la galerie augmente, moins l'importance de l'arcade d'entrée se fait sentir – d'où une galerie de 4 arcades

<sup>3</sup> Voir la formalisation des plans de coupe en annexe

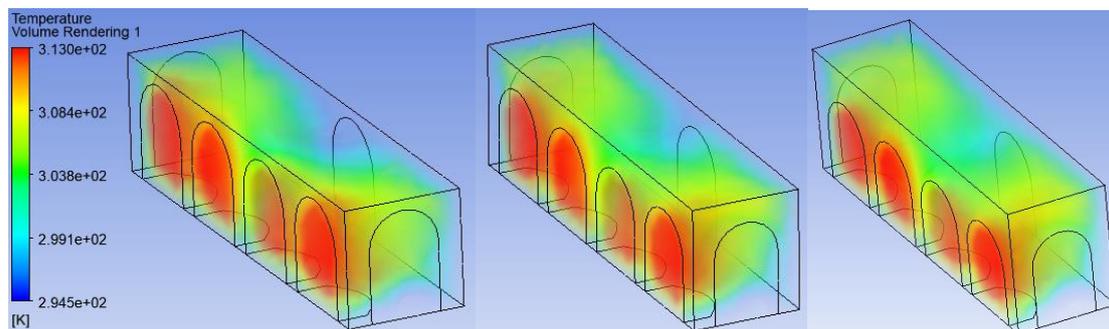
déjà bien moins confortable que celle de 3 arcades – jusqu’à ne plus avoir aucun effet à partir d’une longueur de 5 arcades.

En d’autres termes, avec des conditions limites différentes en arcade d’entrée, ce qui est forcément le cas dans d’autres situations, le résultat de longueur limite à partir de laquelle ce paramètre n’impacterait plus le confort serait identique, seule la valeur de cette longueur limite changerait. De cette analyse, il est donc possible de déduire que le paramètre « longueur de la galerie » n’impacte aucunement le comportement microclimatique asymptotique de cet espace.

### 4.3.3. Impact de la hauteur

Le second paramètre que l’on a fait varier est la hauteur de la galerie. La méthode d’analyse sera ici aussi identique à ce qui a pu être réalisé dans les parties précédentes, et sera la même dans la variation du dernier paramètre dans la section suivante. Dix galeries ont été simulées avec chacune une hauteur différente, partant de 4 mètres de hauteur, puis en augmentant par pas de 0,5 mètre la hauteur jusqu’à 8 mètres de hauteur. Seule la dernière galerie présente un écart de 1 mètre par rapport à la précédente, puisqu’elle affiche une hauteur de 9 mètres. Nous avons donc les hauteurs suivantes (en mètre) : 4 ; 4,5 ; 5 ; 5,5 ; 6 ; 6,5 ; 7 ; 7,5 ; 8 et 9. Là encore, les différentes dimensions choisies l’ont été sur la base de plusieurs galeries visitées pendant le Travail de Fin d’Études – comme celles des patios du Grand Hôtel-Dieu de Lyon, celles de certaines traboules du Vieux-Lyon ou encore celles des grandes rues commerçantes du centre de Paris (Rue Rivoli par exemple). La longueur n’ayant pas d’impact sur le microclimat d’après la section 4.3.2., les galeries ont été construites avec une longueur de 4 arcades et une profondeur de 4 mètres. Les conditions aux limites seront identiques à la section précédente, toujours dans l’optique de simuler un réchauffement climatique à venir.

Ici aussi, il est possible de conjecturer les résultats attendus. Contrairement à la section précédente, la variation de la hauteur de la galerie ne va pas induire d’évolution du nombre d’arcades constituant autant de sources d’air chaud. A priori, on pourrait s’attendre à ce que la température maximale au sein de la galerie n’évolue pas non plus en fonction de la hauteur, sur le plan horizontal de 1,5 mètres de hauteur du moins. Cependant, l’augmentation de la hauteur de la galerie pourrait permettre, grâce sa surface de paroi et son volume d’air plus importants, de dissiper plus facilement la chaleur incidente. De ce fait, on pourrait s’attendre à constater des gradients de température spatiaux plus importants avec une augmentation de la hauteur.



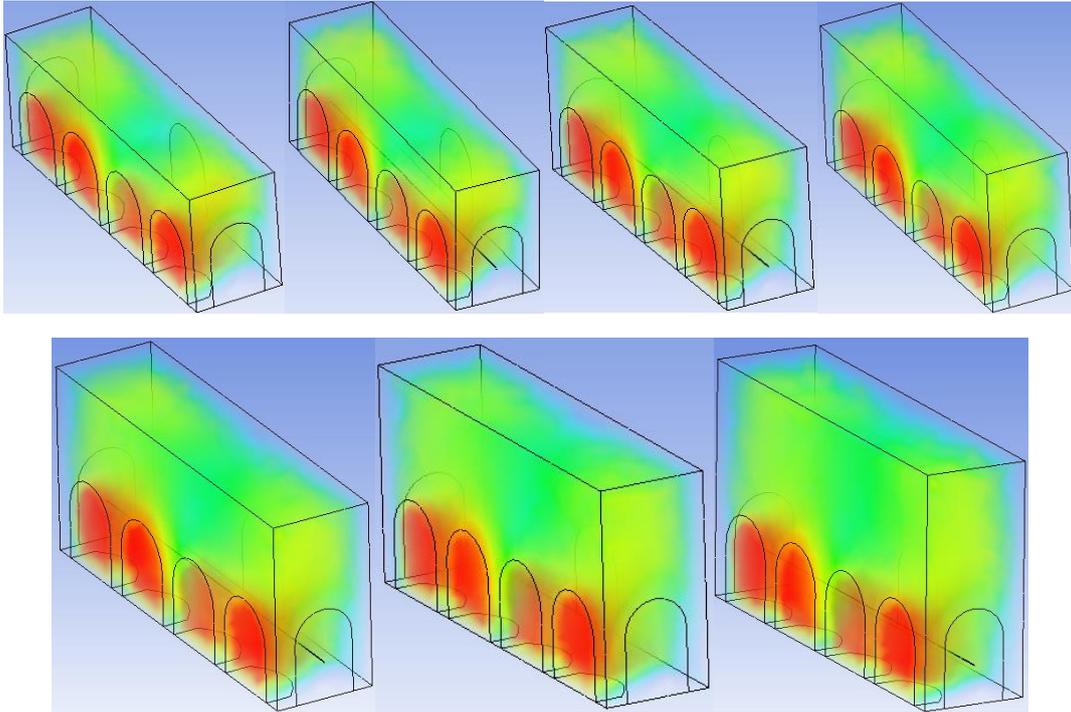
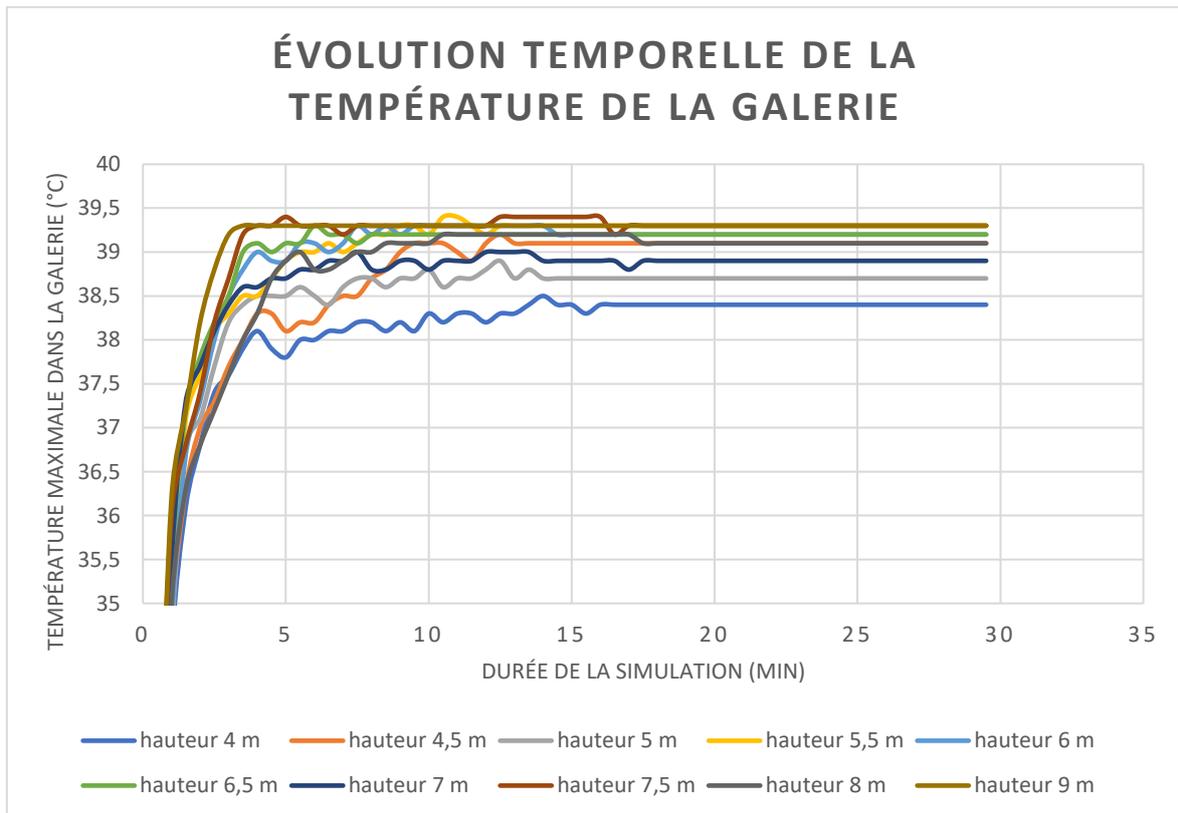
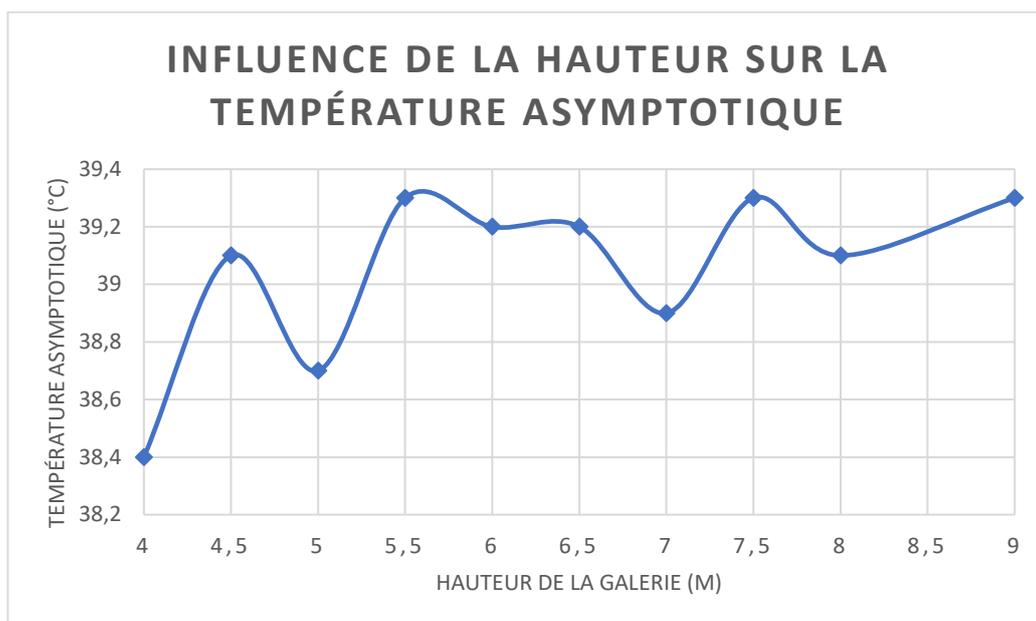


Figure 45 : Distribution spatiale de la température en fonction de la hauteur de la galerie par hauteur croissante. Résultats à l'issue de la simulation



Graphique 14 : Impact de la hauteur de la galerie sur sa température maximale intérieure. Les 10 cas d'études sont superposés sur le même graphique

La construction du Graphique 14 nous montre des comportements asymptotiques similaires. Pour une température extérieure de 45 °C, l'ensemble des cas d'études montrent des températures intérieures maximales asymptotiques comprises entre 38,4 °C et 39,3 °C, soit quasiment un degré Celsius d'écart entre l'ensemble des cas, ce qui pourrait paraître non négligeable. Cela étant, l'évolution de cette température asymptotique n'est pas linéaire en fonction de la hauteur de la galerie. Pour s'en convaincre, il suffit de constater que la température asymptotique de la galerie de 4,5 mètres de hauteur est supérieure à celle des galeries de 5 et de 7 mètres de hauteur. Cette relation entre température asymptotique et température est tracée dans le Graphique 15 suivant.



Graphique 15 : Évolution de la température asymptotique maximale de la galerie en fonction de sa hauteur

Une brève analyse du graphique précédent montre qu'il semble extrêmement difficile voire impossible de définir une régression permettant de prédire l'évolution de la température asymptotique maximale de la galerie en fonction de sa hauteur. De plus, pour un si faible écart de température asymptotique (1 °C) relativement aux valeurs en elles-mêmes (près de 40 °C), les différences peuvent également s'expliquer par des approximations et des hypothèses afin de simplifier la réalité, ce qui biaise le résultat final. Il résulterait de cette analyse que le paramètre hauteur n'aurait pas d'impact sur le confort à 1,5 mètres de hauteur, qui est la hauteur à laquelle est ressentie la température pour un usager, rappelons-le.

La distribution de température sur le même plan que la section précédente a été tracée pour chaque cas. Les distributions obtenues étaient identiques pour les dix galeries simulées, à quatre ou cinq dixièmes de degrés Celsius près, ce qui est trop faible pour s'expliquer par la variation du paramètre hauteur, ce qui va dans le sens du résultat précédent : la hauteur de la galerie n'a pas d'influence sur la température ressentie par un usager.

Les distributions spatiales ont été déterminées lors du traitement des résultats, elles sont visibles sur la Figure 45 (la légende est la même pour tous les rendus visuels). Comme ce qui avait été conjecturé,

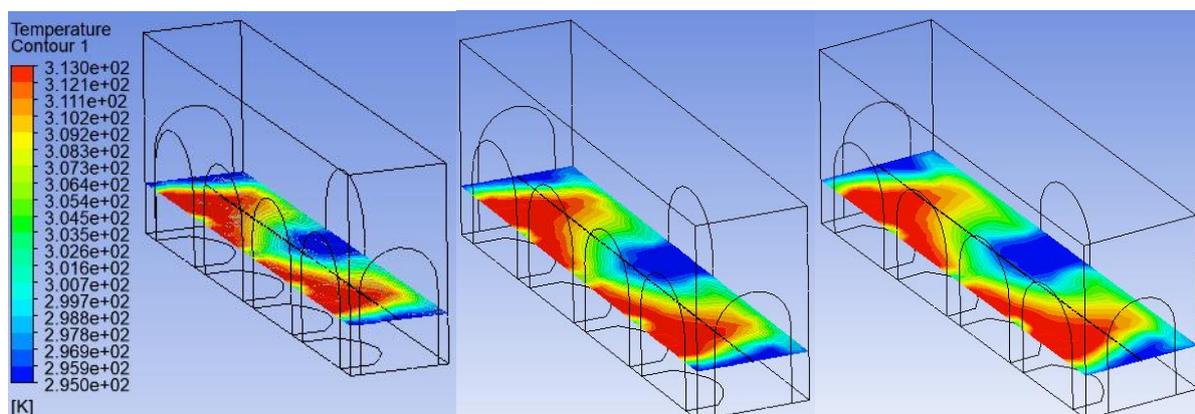
la hauteur de la galerie a un impact sur le gradient de température. En effet, plus la galerie est haute, plus on constate que dans la partie élevée de la galerie, la température se refroidit, ce qui pourrait s'expliquer par des mécanismes exhibés en hypothèses : avec une augmentation de la hauteur, la surface de parois et le volume d'air seraient plus importants tandis que les arrivées d'air chaud ne changeraient pas, permettant plus d'échanges de chaleur, et donc une dissipation plus importante de la chaleur dans la partie haute de la galerie.

De cette section, on retiendra donc que les variations de températures asymptotiques maximales ne sont pas suffisamment significatives pour les imputer au paramètre « hauteur de la galerie », celles-ci pouvant s'expliquer par des approximations et simplifications de la réalité. Ainsi, ce paramètre n'a pas d'influence sur le potentiel de confort microclimatique pour les usagers d'un tel espace comme espace extérieur.

#### 4.3.4. Impact de la profondeur

Le dernier paramètre que l'on fera varier est la profondeur de la galerie. La méthode d'analyse sera similaire à celles qui ont permis l'analyse des autres paramètres, à ceci près que la température maximale de la galerie sera évaluée sur une droite traversant la galerie à mi-profondeur, à une hauteur de 1,5 mètres de haut. La profondeur étant la variable dans cette section, la droite sur laquelle on lira la température maximale sera elle aussi variable. Ici aussi, dix galeries ont été simulées chacune avec une profondeur différente, partant de 3 mètres de profondeur, puis augmentant cette variable par pas de 0,5 mètres jusqu'à une profondeur de 7,5 mètres. Nous avons donc les profondeurs suivantes (en mètres) : 3 ; 3,5 ; 4 ; 4,5 ; 5 ; 5,5 ; 6 ; 6,5 ; 7 et 7,5. Toujours dans un souci de fidélité, ces valeurs ont été choisies par rapport à des dimensions de galeries réelles. Les dix galeries ont été construites avec des longueurs de 4 arcades et des hauteurs de 6 mètres, avec les mêmes conditions aux limites que les sections précédentes, afin de simuler des conditions de canicule qui se présenteront de plus en plus avec le réchauffement climatique en cours.

Les résultats attendus ici pourraient différer des sections précédentes. En effet, les entrées d'air sont les mêmes quelle que soit la profondeur de la galerie. De la même façon que les simulations précédentes, on peut espérer un équilibre thermique entre les entrées d'air chaud des arcades extérieures et les entrées d'air plus frais de l'arcade d'entrée et des arcades latérales dans une zone située plus proche des arcades extérieures que de l'arcade d'entrée.



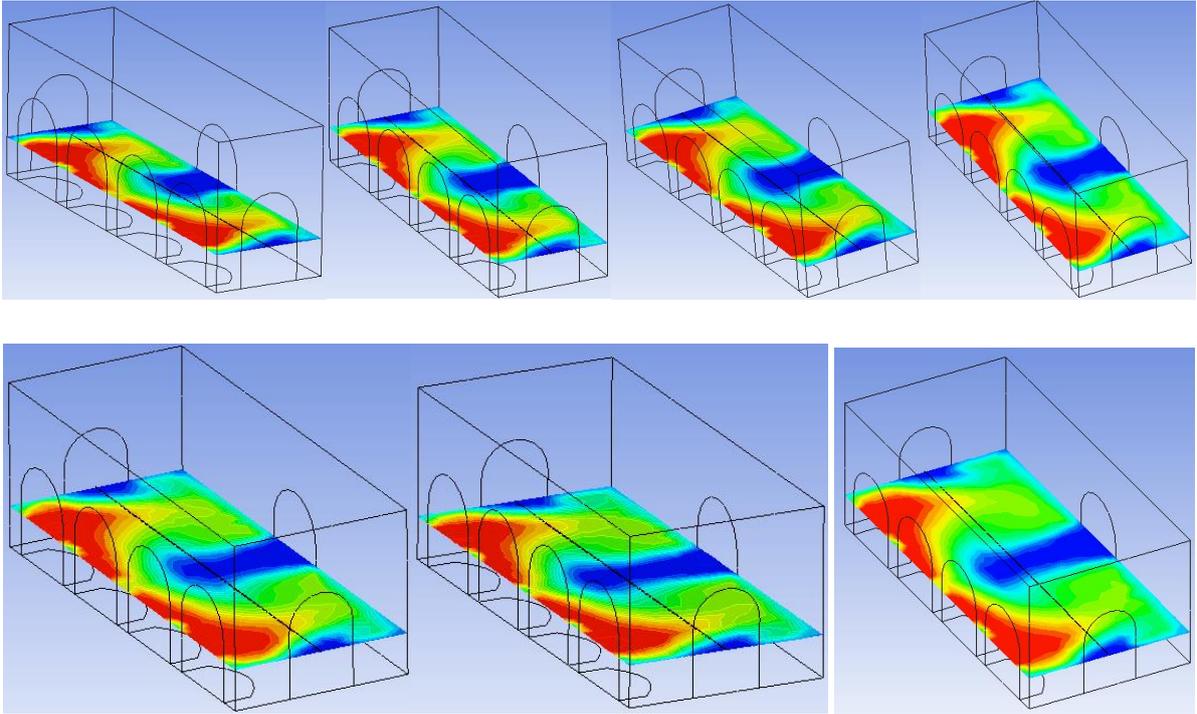
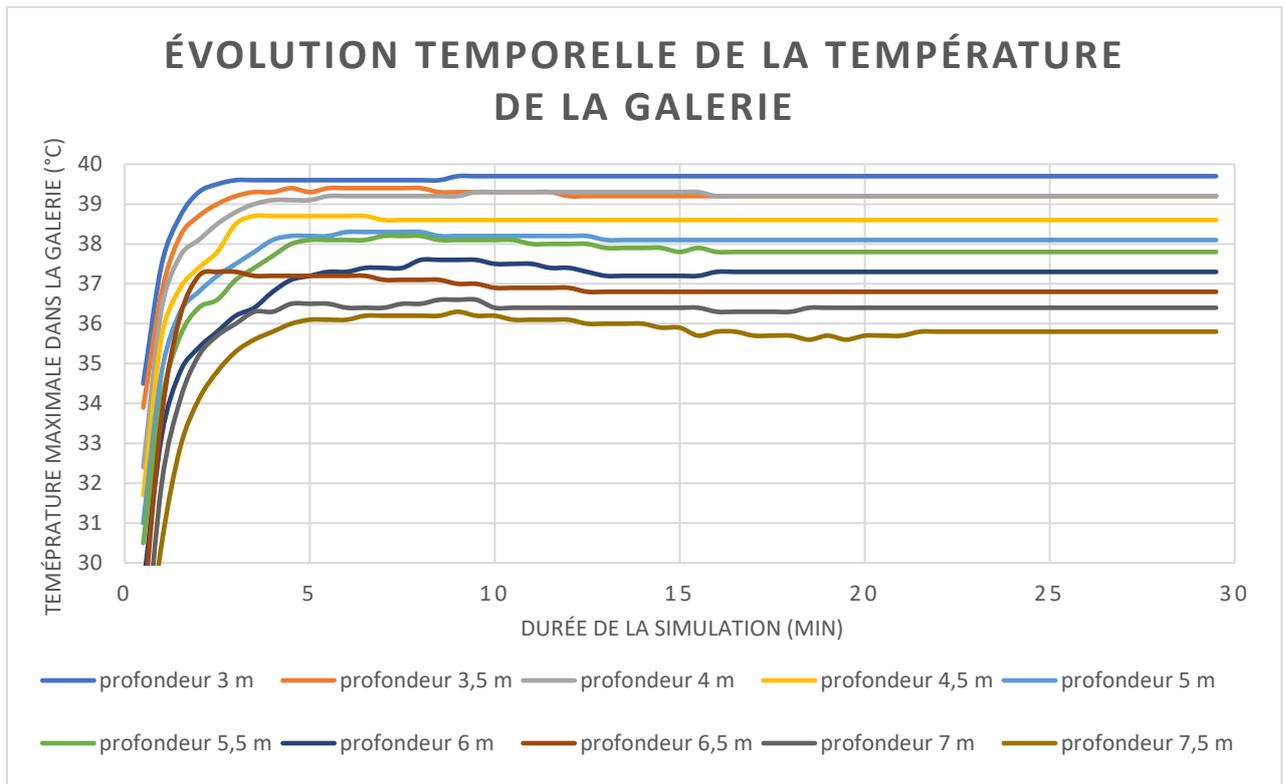


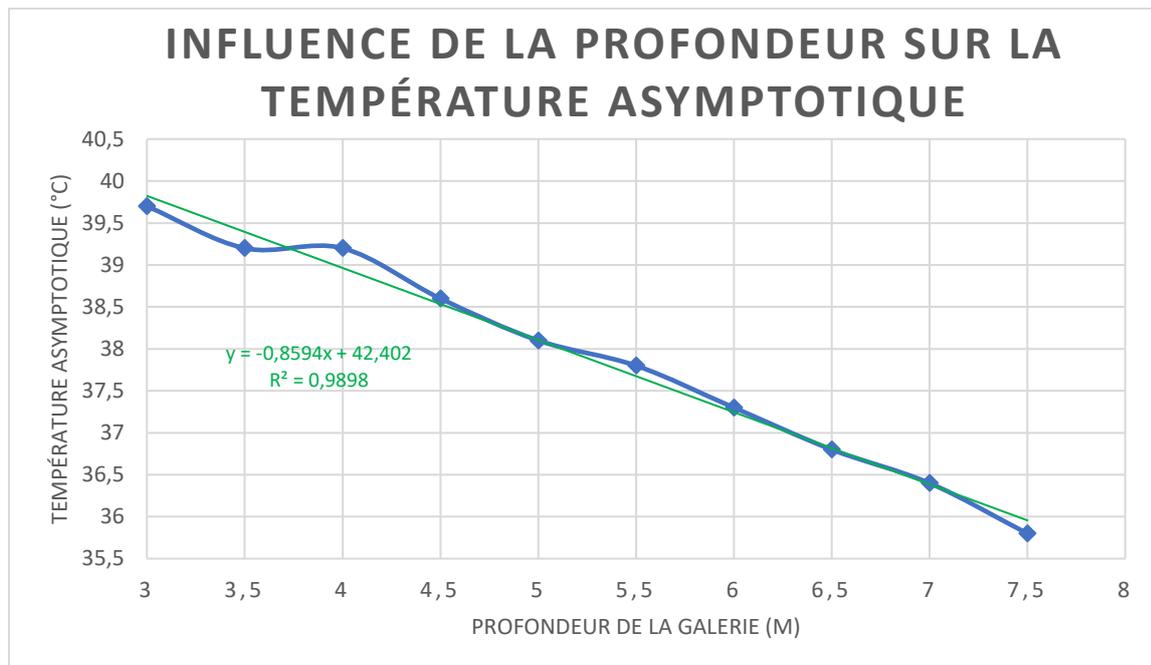
Figure 46 : Distribution planaire de la température en fonction de la profondeur de la galerie par profondeur croissante. Résultats à l'issue de la simulation.



Graphique 16 : Impact de la profondeur de la galerie sur sa température maximale intérieure. Les 10 cas d'études sont superposés

Ainsi, plus la profondeur est importante, plus la partie éloignée des arcades extérieures seraient confortables d'un point de vue thermique pour l'utilisateur. Pour s'en convaincre, seront tracés ici les distributions de température sur le même plan horizontale que dans les sections précédentes, ainsi que l'évolution des températures maximales en fonction du temps.

Le traitement des résultats sur le post-processeur a permis de construire les distributions de température sur le plan horizontal de 1,5 mètres de hauteur sur la Figure 46 et les courbes de températures en fonction du temps sur le Graphique 16. Les dix cas d'étude sont superposés sur le même graphique. Ce dernier permet de voir clairement des différences de températures maximales asymptotiques en fonction de la profondeur. En effet, contrairement au paramètre « hauteur de la galerie », on constate ici une évolution ordonnée de la température asymptotique en fonction de la profondeur, avec des écarts de température maximale asymptotique significatif entre les différentes simulations, qui seraient difficilement imputables à des approximations ou à des erreurs. Plus précisément, cette dernière va diminuer à mesure que la profondeur de la galerie va augmenter. On peut tracer l'évolution de la température maximale asymptotique en fonction de la profondeur, et essayer différents modèles de régression afin de pouvoir mettre en équation l'évolution de la température maximale intérieure asymptotique de la galerie en fonction de la profondeur de la galerie. On retrouve ceci sur le Graphique 17 ci-dessous.



Graphique 17 : Évolution de la température asymptotique maximale de la galerie en fonction de sa profondeur

Grâce à ce graphique, on remarque une évolution de la température quasiment linéaire en fonction de la profondeur. De ce fait, un modèle de régression linéaire a été tracé afin de pouvoir comparer l'évolution réelle de la température au modèle statistique. Le coefficient de régression a été affiché, ainsi que l'équation statistique découlant du modèle. On constate un coefficient  $R^2 = 0,9898$  ce qui donne  $R = 0,9949$ , un modèle donc très satisfaisant pour décrire l'évolution réelle de la température en fonction de la profondeur, dans la gamme de profondeurs testées. La relation semble être satisfaisante pour décrire la réalité, et mériterait une analyse statistique approfondie.

Afin de vérifier que cette évolution linéaire est effectivement imputable au paramètre profondeur, il convient d'analyser les résultats visuels fournis sur par la Figure 46. Sur celle-ci, on remarque qu'avec l'augmentation de la profondeur, l'arrivée d'air frais par l'arcade d'entrée « l'emporte » sur les arrivées d'air chaud des arcades, et que ceci a une incidence sur la distribution des températures sur le plan considéré. En effet, il semble que la vitesse de l'air chaud soit trop faible par rapport à celle de l'air frais par l'arcade d'entrée, ce qui résulte en un renouvellement d'air principalement en provenance de l'arcade d'entrée, d'où une température asymptotique maximale plus faible quand la profondeur augmente. De plus, bien que la longueur de galerie n'ait pas d'impact direct sur le confort de la galerie, il semblerait qu'il joue ici indirectement un rôle : en effet, le paramètre « profondeur » a été étudié avec un paramètre « longueur » fixe, mais faible (4 mètres). Ainsi, la place occupée par l'arcade d'entrée est relativement importante par rapport à la longueur totale. De ce fait, il n'y pas d'arrivée d'air chaud « loin » de cette arcade d'entrée, c'est pour cela que c'est l'air frais qui l'emporte ici. Si les simulations du paramètre « profondeur » avaient été réalisées avec une longueur fixe, mais plus importante – 10 arcades par exemple – il est fort possible que les arrivées d'air chauds par les arcades extérieures situées les plus loin de l'arcade d'entrée n'aient pas été perturbées par l'air frais arrivant par cette dernière.

Le résultat du Graphique 17 serait donc valable uniquement pour des géométries ayant de faibles longueurs, mais également avec des conditions aux limites bien spécifiques : il serait nécessaire que la vitesse d'air (frais) en provenance de l'arcade d'entrée soit significativement plus importante que celle de l'air (chaud) en provenance des arcades extérieures. Dans de telles conditions qui certes, ne représentent pas l'ensemble des galeries mais néanmoins un nombre non négligeable – les galeries visitées durant ce TFE et évoquées dans la section 4.3.3. en sont un exemple, les résultats obtenus dans cette analyse du paramètre « profondeur » sont valides, pour une gamme de profondeur variant entre 3 et 7,5 mètres. Dans ce cas, l'évolution de la température maximale asymptotique  $T_{ma}$  en fonction de la profondeur  $p$  peut être décrite par l'équation suivante :

$$\begin{cases} T_{ma} = a * p + b \\ a = -0,8594 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1} \\ b = 42,402 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (19)$$

#### 4.3.5. Discussions

Bien qu'il ait été supposé que le modèle de la galerie soit fidèle à la réalité lors de la confrontation de celui-ci aux mesures réalisées, il est nécessaire de s'interroger sur la pertinence des simulations réalisées pour les différents paramètres testés. L'ensemble des simulations réalisées ont abouti à un équilibre thermique extrêmement rapide et stable, ce qui diffère de la réalité (cf Graphique 6, section 2.5.1.). Les mesures in situ révèlent un équilibre un peu moins stable, et surtout, une date d'équilibre plus lent. Cela n'est pas spécifiquement lié à des erreurs lors de la création du modèle ou à des approximations injustifiées. C'est justement le fait d'avoir créé un modèle, qui par définition est une représentation simplifiée de la réalité, que l'équilibre est si stable et si rapide, certains phénomènes complexes ont été négligés.

Les résultats des simulations de la partie 4 en eux-mêmes semblent parfois déroutants. En effet, dans une galerie réelle, qu'il fasse 35 °C au Soleil ou 45 °C, on ne ressent pas autant de différence de températures que celles affichées par les simulations. Dans la réalité, il a été démontré dans la littérature que cet espace, agissant sur le rayonnement solaire incident de la même façon qu'une cour

intérieure, est un espace tampon, c'est-à-dire que sa température varie peu lorsque les conditions extérieures varient. Or ici, on constate une différence de quasiment 9 °C au sein de la galerie lorsque les conditions extérieures varient de 10 °C, ce qui va à l'encontre des résultats démontrés. Plusieurs pistes explicatives peuvent être avancées pour expliquer ceci :

- La modélisation du rayonnement solaire n'est pas correcte vis-à-vis de la réalité, il faudrait implémenter un calculateur de trajectoire solaire dans le logiciel pour résoudre le problème.
- Le calculateur Fluent ne modélise pas correctement la masse thermique des parois, ni l'ombrage.
- L'hypothèse simplificatrice de modéliser les conditions météorologiques extérieures par une condition aux limites n'est pas représentative, auquel cas, il faudrait modéliser la galerie dans son environnement urbain, avec des logiciels adaptés, comme Envi-MET par exemple.

Un autre résultat qui peut sembler déroutant sont les températures en elles-mêmes calculées par Fluent, qui semblent anormalement élevées dans la galerie – jusqu'à 40 °C dans une galerie ombragée. Ceci peut s'expliquer par l'une des trois pistes explicatives précédentes.

Cependant, le modèle de référence construit et simulé dans la partie 3 reste solide, il a été éprouvé tout au long de la section 4.1. Malgré une différence de température de 1,5 °C entre le calculateur et les mesures réalisées sur site, les comportements réels et simulés sont identiques. C'est donc lors du test des différents paramètres que le problème est apparu. La conclusion qui semble s'imposer ici est que pour des températures plus élevées, la masse thermique n'est plus modélisée correctement par Fluent, mais aussi que la modélisation des conditions météorologiques extérieures a été trop simplifiée.

Cela étant, le comportement du modèle avec des conditions plus extrêmes et des paramètres qui varient reste similaire au comportement du modèle de référence, les résultats obtenus sont donc significatifs, ils méritent simplement d'être améliorés par des modèles plus précis. Ainsi, il est possible d'avancer plusieurs conclusions qui devront être vérifiées ultérieurement :

- La galerie présente un confort maximal lorsque le Soleil est à son zénith.
- La configuration la plus confortable est celle qui, en plus des arcades ouvertes sur l'extérieures (sources d'air chaud), affiche des arcades latérales et une arcade d'entrée.
- Les paramètres « longueur » et « hauteur » de la galerie n'influent pas sur le confort de l'utilisateur de celle-ci.
- Le paramètre « profondeur » a un impact significatif dans les conditions de simulations. La température intérieure maximale asymptotique diminue de façon linéaire à mesure que la profondeur augmente.

Afin d'approfondir ces résultats et de caractériser en détail le microclimat au sein d'une galerie ouverte d'un côté sur l'extérieur, plusieurs paramètres doivent encore être testés :

- La combinaison de chaque valeur de hauteur, profondeur et longueur doit être réalisée.
- L'influence du matériau composant les parois de la galerie doit être testée.
- L'orientation du côté ouvert de la galerie par rapport au Soleil doit également être analysée.

D'autres paramètres peuvent être analysés afin d'étudier la réponse de la galerie, comme le contexte urbain, le climat par exemple. Des mesures plus précises seraient nécessaires afin de caractériser correctement les conditions météorologiques extérieures dans ce modèle. Un travail additionnel est également nécessaire afin de traduire l'évolution du climat prévue dans les décennies à venir dans le modèle présenté ici.

## CONCLUSION

Ce mémoire a présenté les différentes étapes ayant permis de construire un modèle thermo-aérodynamique d'une galerie semi-ouverte à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides – ANSYS-Fluent. La construction de celui-ci fait suite à une analyse bibliographique qui a mis en évidence des lacunes dans la littérature concernant la compréhension de cet espace qu'est la galerie. Afin de le rendre aussi représentatif que possible de la réalité, le paramétrage de ce modèle a été réalisé en fonction de mesures réalisées sur une galerie réelle : le cloître du musée des Beaux-Arts de Lyon. Les résultats obtenus ne sont donc valables que pour les conditions extérieures qui régnaient le jour des mesures en ce lieu précis : un vent extrêmement faible, une journée d'été relativement chaude, avec des passages nuageux. Il est possible de transposer ce modèle dans un autre lieu ayant un climat, une morphologie urbaine différents dès lors que l'on parvient à traduire précisément ces caractéristiques dans le logiciel Ansys-Fluent. De la même façon, il est possible de transposer ce modèle dans un futur avec un réchauffement climatique.

Il est cependant difficile d'établir des résultats précis et fiables avec un tel logiciel étant donné qu'il est complexe de caractériser l'évolution des conditions limites dans le temps. Celles-ci peuvent évoluer de façon complètement aléatoire dans le temps, il n'est donc pas possible d'implémenter cette évolution dans le calculateur Fluent. De plus, la galerie a été modélisée isolément des bâtiments urbains alentours, c'est l'une des limites du modèle et du logiciel dans son ensemble. Afin d'obtenir des résultats précis et fiables, il faudrait modéliser la galerie dans son environnement, la contrepartie étant un temps de simulation considérablement plus élevé. Le nombre de simulations présentes dans cette étude étant conséquent, cette solution était inenvisageable. Cela aurait de plus nécessité une maîtrise bien plus poussée du logiciel Ansys-Fluent, ce qui implique une compréhension avancée des phénomènes et des équations de mécanique des fluides et un temps de pratique immense sur le logiciel, d'où un modèle simplifié dans cette étude.

Les objectifs initiaux de cette étude étaient de créer un modèle de galerie confronté à la réalité, puis d'explorer différentes pistes permettant d'améliorer le confort de celle-ci. Il ressort finalement de ce travail que le modèle de référence créé, bien qu'affichant des valeurs de températures plus élevées que la réalité, offre un comportement fidèle à la réalité. Ce modèle a permis de comprendre davantage comment évoluait le microclimat au sein de la galerie en fonction des conditions aux limites modélisant l'extérieur : les résultats semblent afficher un fonctionnement similaire à celui d'une cour intérieure. C'est l'apport d'une part conséquente d'ombrage dans la galerie qui fait de cet espace un lieu agréable en période estivale, lorsque les parois (sols et murs) de la galerie n'ont pas absorbé trop de chaleur et ne présentent pas une température de surface trop élevée.

Le second objectif principal du Travail de Fin d'Études était de trouver la configuration géométrique optimale de la galerie permettant le meilleur confort. Ayant testé l'influence de la position du Soleil, de la hauteur, de la profondeur et de la longueur de la galerie, les résultats suivants ressortent de cette analyse :

- La galerie offre un confort maximal lorsque le Soleil est à son zénith (tache solaire minimale, écart de température entre intérieur et extérieur maximal).

- La configuration offrant un confort maximal est la présence d'une arcade d'entrée ombragée constituant une source d'air frais pour la galerie.
- Les paramètres « longueur » et « hauteur » n'ont pas d'incidence notable pour l'utilisateur.
- Le paramètre « profondeur », dans les conditions d'expérimentations, a une incidence significative : plus la galerie est profonde, plus elle sera confortable (l'écart de température augmente linéairement avec la profondeur).

Bien que l'ensemble des objectifs du TFE aient été atteints, de tels résultats doivent être précisés, vérifiés par des modèles plus précis, mais peuvent d'ores et déjà constituer un critère déterminant dans la conception ou la réhabilitation de tels espaces. Comme l'ensemble des espaces extérieurs tampons, la galerie est un espace crucial pour le réchauffement climatique à venir, puisqu'il offre un confort thermique important pour l'utilisateur extérieur. Ainsi, dans un contexte où l'être humain pourrait se retrouver confiné en intérieur lors d'importantes canicules futures, la galerie – de la même façon qu'un patio ou une cour intérieure – constitue un espace résilient au réchauffement climatique, et offre une alternative viable pour pouvoir continuer de vivre en extérieur.

En complément de cette étude, pourraient être étudiés le comportement des usagers de tels espaces, leurs réactions physiologiques ou psychologiques, mais également de potentielles économies d'énergie d'un bâtiment attenant à cet espace tampon tout au long de l'année. En insérant ce modèle de galerie dans un contexte urbain, il serait ainsi possible d'évaluer des économies d'énergie de chauffage en hiver ou de climatisation en été grâce à la présence d'un tel espace tampon attenant audit bâtiment.

## Bibliographie

- [1] Gauthiez, B. 2003. « Espace urbain : Vocabulaire et morphologie ». *Paris : Editions du Patrimoine* p.449.
- [2] Benigni, C. 2014. « Les espaces intermédiaires et la densification des tissus périurbains ». *Carnets de Géographes* 7.
- [3] Andréa, I. 2013. « Entre-deux : Habiter la limite entre l'extérieur et l'intérieur de la maison dans le quartier Saint-Sauveur ». *Ecole d'architecture, Université de Laval*.
- [4] Plassart, S. 2015. « L'atrium central dans les bâtiments tertiaires contemporains : l'intériorité par l'atrium, usages et ambiances au cœur des bureaux ». *Architecture, aménagement de l'espace*.
- [5] Zamani, Z., S. Heidari and P. Hanachi. 2018. « Reviewing the thermal and microclimates function of courtyards ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93 : 580-595.
- [6] Gamero-Salinas, J., N. Kishnani, A. Monge-Barrio, J. López-Fidalgo and A. Sánchez-Ostiz. 2021. « The influence of building form variables on the environmental performance of semi-outdoor spaces. A study in mid-rise and high-rise buildings of Singapore ». *Energy & Buildings* 230.
- [7] Guedouh, M.S. and N. Zemmouri. 2017. « Courtyard building's morphology impact on thermal and luminous environments in hot and arid region ». *Renewable Energy, Environment and Sustainability*.
- [8] Al-Hafitha, O., S. B K, S. Bradburyc and P. de Wilded. 2017. « The impact of courtyard parameters on its shading level : An experimental study in Baghdad, Iraq ». *Energy Procedia* 134 : 99-109.
- [9] Soflaei, F., M. Shokouhian and S.M.M. Shemirani. 2016. « Traditional Iranian courtyards as microclimate modifiers by considering orientation, dimensions, and proportions ». *Frontiers of Architectural Research* 5 : 225-238.
- [10] Muhaisen, A.S. and M.B. Gadi. 2006. « Shading performance of polygonal courtyard forms ». *Buildings and Environment* 41 : 1050-1059.
- [11] Su, Y., L. Liu, J. Liao, J. Wu, P. Ciais, J. Liao, X. He, X. Liu, X. Chen, W. Yuan, G. Zhou and R. Laforizza. 2020. « Phenology acts as a primary control of urban vegetation cooling and warming: A synthetic analysis of global site observations ». *Agricultural and Forest Meteorology* 280.
- [12] Gkatsopoulos, P. 2017. « A methodology for calculating cooling from vegetation evapotranspiration for use in urban space microclimate simulations ». *Procedia Environmental Sciences* 38 : 477-484.
- [13] Venhari, A.A., M. Tenpierik and M. Taleghani. 2019. « The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate ». *Journal of Arid Environments* 166 : 68-76.
- [14] Morille, B. and M. Musy. 2017. « Comparison of the impact of three climate adaptation strategies on summer thermal comfort – Cases study in Lyon, France ». *Procedia Environmental Sciences* 38 : 619-626.
- [15] Muhaisen A.S. 2006. « Shading simulation of the courtyard form in different climatic regions ». *Building and Environment* 41 : 1731-1741.

- [16] Martinelli, L. and A. Matzarakis. 2017. « Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones ». *Sustainable Cities and Society* 29 : 97-106.
- [17] Rivera-Gómez, C., E. Diz-Mellado, C. Galán-Marín and V. López-Cabeza. 2019. « Tempering potential-based evaluation of the courtyard microclimate as a combined function of aspect ratio and outdoor temperature ». *Sustainable Cities and Society* 51.
- [18] Al-Hinai, H., W.J. Batty and S.D. Probert. 1993. « Vernacular architecture of Oman: features that enhance thermal comfort achieved within buildings ». *Applied Energy* 44 : 233-258.
- [19] Desogus, G., L.G.F. Cannas and A. Sanna. 2016. « Bioclimatic lessons from Mediterranean vernacular architecture: The Sardinian case study ». *Energy and Buildings* 129 : 574-588.
- [20] Widera, B. 2021. « Comparative analysis of user comfort and thermal performance of six types of vernacular dwellings as the first step towards climate resilient, sustainable and bioclimatic architecture in western sub-Saharan Africa ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140.
- [21] Philokyprou, M., A. Michael and E. Malaktou. 2021. « A typological, environmental and socio-cultural study of semi-open spaces in the Eastern Mediterranean vernacular architecture: The case of Cyprus ». *Frontiers of Architectural Research*.
- [22] Chang, S., W. He, H. Yan, L. Yang and C. Song. 2021. « Influences of vernacular building spaces on human thermal comfort in China's arid climate areas ». *Energy & Buildings* 244.
- [23] Abdulkareem, H.A. 2016. « Thermal comfort through the microclimates of the courtyard. A critical review of the middle-eastern courtyard house as a climatic response ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 216 : 662-674.
- [24] Fezzioui, N., M. Benyamine, N. Tadj, B. Draoui and S. Larbi. 2021. « Performance énergétique d'une maison à patio dans le contexte maghrébin (Algérie, Maroc, Tunisie et Libye) ». *Journal of Renewable Energies* 15(3) :399-405.
- [25] Muhaisen A.S. and M.B. Gadi. 2006. « Effect of courtyard proportions on solar heat gain and energy requirement in the temperate climate of Rome ». *Buildings and Environment* 41 : 245-253.
- [26] Kong, F., C. Sun, F. Liu, H. Yin, F. Jiang, Y. Pu, G. Cavan, C. Skelhorn, A. Middel and I. Dronova. 2016. « Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer ». *Applied Energy* 183 : 1428-1440.
- [27] Lin, W., T. Wu, C. Zhang and T. Yu. 2011. « Carbon savings resulting from the cooling effect of green areas: A case study in Beijing ». *Environmental Pollution* 159 : 2148-2154.
- [28] Kofoed, N.-K. and M. Gaardsted. « Taking into account the wind in urban spaces ». *RUROS – Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces* : 8-14.
- [29] Auffray, A., A. Brisson, A. Tamburini, V. Dziak, V. Maloisel and S. Martinoni-Lapierre. « Climat de la région Rhône-Alpes ». *Météo-France Centre-Est, Division Développements-Etudes-Climatologie*.
- [30] « Adaptation au changement climatique – Socle des connaissances locales ». 2014. *Plan Climat Energie Territoriale, Grand Lyon*.
- [31] « Etude du changement climatique pour le SRCAE Rhône-Alpes ». 2010. *Météo-France Centre-Est, Division Développements-Etudes-Climatologie*.
- [32] Moonen, P., V. Dorer and J. Carmeliet. 2011. « Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 : 414-423.

## **ANNEXES**

### **ANNEXE A : Caractéristiques techniques des appareils de mesures**

Anémomètre multisonde KIMO VT 200

Appareil de mesures multifonction TESTO 435-1

Thermomètre infrarouge sans contact Thermoflash LX-26<sup>E</sup>

### **ANNEXE B : Formalisation des plans de coupe – Nomenclature des paramètres géométriques**

## ANNEXE A : Caractéristiques techniques des appareils de mesures

# Anémomètre multisonde

VT 200

KIMO

### DESRIPTIF



Le VT200 a été développé pour le contrôle de vitesse et de débit d'air. Simple, précis et convivial, il est équipé d'un grand afficheur et d'un joystick pour faciliter la navigation dans les menus. Multisonde, il peut être pourvu : > d'une sonde à hélice Ø 14 mm pour les mesures directes en gaines de 0,8 à 40 m/s et de 0 à 99999 m³/h, > de sondes à hélice Ø 70 mm et 100 mm avec détection du sens de rotation du flux d'air et température intégrée, pour les contrôles en sortie de bouches de ventilation de 0,2 à 35 m/s et de 0 à 99999 m³/h, > de sondes fil chaud standard et fil chaud télescopique colde- cygne pour le contrôle des faibles courants d'air en gaine et en sortie de grille de ventilation, > de sondes de température Pt100 de - 50 à + 250 °C. Toutes les sondes à hélice ou fil chaud peuvent être utilisées avec des cônes de débit de différentes dimensions pour mesurer le débit en sortie de bouches de ventilation ou de VMC. Les dimensions de ces cônes sont enregistrées dans le programme du VT200, permettant ainsi d'obtenir directement les mesures de débit d'air. L'anémomètre est capable de mesurer, d'enregistrer 12 000 valeurs et de les restituer sur PC via une liaison radio (sans fil).

## 435-1 - Appareil de mesure multifonctions - Testo

[Testo](#) [Appareil de mesure multifonctions](#)



Dimensions externes	220 x 46 x 74 mm (L x H x l)
Garantie	2 ans
Disponibilité	Habituellement 2 semaines
Affichage	LCD 2 lignes
Précision	± 0.3°C (-60...60°C), ± 0.5% v.m.
Précision (vitesse d'air)	Selon sonde
Gamme de température	-200...1370 (avec TC type K)
Gamme de mesure vitesse d'air	0...60 m/s (avec sonde hélice)

# Thermoflash LX-26 évolution thermomètre infrarouge sans contact

Prise de température instantanée et sans contact

## Spécifications techniques :

- Plage de mesure :
  - Corps : 32°C à 42,9°C
  - Surface : 0°C à 93,3°C
  - Ambient : 0°C à 50°C
- Précision : +/- 0.2°C
- Distance de mesure : 2 cm à 5 cm max
- Arrêt automatique : 5 sec
- Mémorisation des données
- Température de fonctionnement : 10° C à 40° C
- Dimensions : 155 mm x 90 mm x 38 mm
- Puissance : DC / 3 v
- Poids : 220 g
- Livré avec 2 piles AA



## ANNEXE B : Formalisation des plans de coupe – Nomenclature des paramètres géométriques

