



HAL
open science

Vers une représentation sensible du vent à l'aide d'un environnement virtuel

Gabriel Giraldo Restrepo

► **To cite this version:**

Gabriel Giraldo Restrepo. Vers une représentation sensible du vent à l'aide d'un environnement virtuel. Architecture, aménagement de l'espace. École centrale de Nantes, 2021. Français. NNT : 2021ECDN0029 . tel-03531739v2

HAL Id: tel-03531739

<https://theses.hal.science/tel-03531739v2>

Submitted on 18 Jan 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.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : Architecture et études urbaines

Par

Gabriel GIRALDO RESTREPO

Vers une représentation sensible du vent à l'aide d'un environnement virtuel

Thèse présentée et soutenue à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, le 06/07/2021

Unité de recherche : UMR CNRS 1563 AAU - Ambiances Architectures Urbanités

Rapporteure avant soutenance :

Cécile REGNAULT Professeure, École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon.

Membres du Jury :

Président :	Thierry DUVAL	Professeur, IMT Atlantique, Brest.
Examineurs :	Malika AUVRAY	Chargée de recherche CNRS HDR, Sorbonne-Université, Paris.
	Mathieu DAVID	Maître de Conférences HDR, Université de la Réunion, St. Pierre.
Dir. de thèse :	Myriam SERVIÈRES	Maître de Conférences HDR, École Centrale de Nantes.
Co-dir. de thèse :	Daniel SIRET	Ingénieur de recherche hors classe (IRHC) HDR, ENSA Nantes.
Co-enc. de thèse :	Guillaume MOREAU	Professeur, IMT Atlantique, Brest.

RÉSUMÉ

Les phénomènes aérauliques jouent un rôle important dans différentes disciplines, parmi lesquelles l'ingénierie, l'architecture et l'urbanisme. De façon générale, ces phénomènes peuvent avoir une influence au niveau constructif et au niveau perceptif et comportemental.

C'est à ce dernier niveau que nous nous intéressons. Il comprend des enjeux de santé, liés à la qualité de l'air, de confort thermique et de confort mécanique, qui peuvent influencer le comportement des personnes et leur façon d'habiter un espace architectural ou urbain. Ses représentations dans ces champs sont principalement visuelles. Elles permettent de comprendre l'influence du phénomène sur le projet. Néanmoins nous pensons qu'elles peuvent être réductrices de sa dimension sensible. Cette dimension peut être mieux identifiée par d'autres moyens d'expression, tel que la peinture et le cinéma. Ici on peut associer l'information reçue à une situation vécue précédemment, on peut imaginer l'effet sur notre corps, il y a une intention de transmettre l'ambiance résultante de la scène. En plus de ces représentations visuelles et audiovisuelles, il existe aussi des questionnements sur la restitution tactile du vent au moyen de la réalité virtuelle. Elles ont pour finalité d'augmenter le sentiment de présence et le réalisme de la scène virtuelle en y ajoutant les flux d'air.

Notre thèse a pour objectif d'explorer ces différents modes de représentation du vent qui peuvent transmettre une intention d'ambiance. Nous avons utilisé pour ce faire une plateforme de réalité virtuelle dans laquelle nous avons adapté un système de ventilateurs commandés numériquement depuis la scène virtuelle. Nous y avons évalué la compréhension des effets du vent et leur incidence sur le sentiment de présence. Dans un premier temps, nous avons étudié la perception en fonction de quatre types de représentation : (I) une représentation audiovisuelle du vent, à laquelle on a ajouté (II) une visualisation de l'écoulement du fluide et (III) une restitution tactile du vent ; finalement on a présenté (IV) toutes ces représentations ensemble. Nous avons trouvé que les situations qui incluaient une restitution tactile du vent ont favorisé la compréhension des propriétés du vent ainsi que le sentiment de présence dans la scène. Dans un second temps nous avons analysé la perception de la force et la direction du vent par rapport à l'échelle de force de

Beaufort. Les résultats ont montré une surestimation de la force du vent.

Ces résultats montrent un intérêt pour la représentation des ambiances urbaines dans les processus de conception et communication du projet architectural et urbain, en exploitant la stimulation sensorielle des spectateurs.

ABSTRACT

Aeraulic phenomena play an important role in several fields, among which engineering, architecture and urban planning. Generally speaking, these phenomena can have a building, as well as perceptual and behavioural influence.

We will focus on the latter aspect. It includes issues involving healthcare, air quality, thermal comfort and mechanical comfort, all of which can influence people's behaviour and their way of inhabiting an architectural or urban space. Its representations in these fields are mainly visual. They allow to understand the influence of the phenomenon on the project. However, we believe that they can be reductive regarding its sensitive dimension. Indeed, such dimension can be better identified with other means of expression, such as painting or cinema. In that case, we can associate the information received with a situation that we have previously experienced, and we can imagine the effect on our body – it aims to convey the ambiance stemming from the scene. Beyond the visual and audiovisual representations, questions regarding the tactile rendition of the wind through virtual reality are also raised. They aim to increase the sensation of presence and the realism of the virtual scene by adding air flows.

This thesis aims to explore the various methods to represent the wind that can convey an ambiance intention. To this end, we have used a virtual reality platform in which we have adapted a system of fans digitally controlled from the virtual scene. We evaluated the understanding of the effects of the wind and their impact on the feeling of presence. First, we studied perceptions depending on four types of representation : (I) an audiovisual representation of the wind, to which we added (II) visualization of the fluid flow and (III) a tactile rendition of the wind. Then, we presented (IV) all the representations together. We found that the situations with a tactile rendition of the wind fostered the understanding of wind properties and the sensation of presence in the scene. Second, we analysed the perception of wind power and direction on the Beaufort scale. Results showed an overestimation of wind power.

The results show an interest for the representation of urban ambiances as part of the design and communication processes around an architectural and urban project, by using the sensory stimulation of viewers.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Myriam Servières, Daniel Siret et Guillaume Moreau, qui m'ont accordé leur accompagnement inconditionnel tout au long de cette recherche. Merci infiniment pour chacune de vos remarques, vos conseils, vos relectures, votre patience et votre grande disponibilité dans toutes les étapes de cette recherche. Cela a été sans aucun doute une très enrichissante expérience d'apprentissage et de développement personnel.

Un grand merci au Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation de France qui m'a fourni le financement nécessaire à cette recherche.

Je remercie aussi les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ma thèse.

Merci à chacun des membres du laboratoire AAU, aux chercheurs, au personnel d'appui à la recherche et aux doctorants, qui ont su assurer une ambiance agréable et amicale, avec des conditions de travail optimales, tout au long de la thèse.

Merci à Houda Belgacem qui a fourni les résultats CFD utilisés lors de notre première expérience, à Monsieur Pierre Molinaro qui m'a expliqué le fonctionnement de la carte ARDUINO et du module relais, et à Maxim Spur pour son aide à la compréhension de l'univers de la programmation.

Merci à ma famille qui malgré la distance, m'a fait sentir sa compagnie inconditionnelle en chaque instant.

Finalement, je tiens à remercier Karen, mon épouse, pour sa compagnie, son appui et sa patience quotidienne tout au long de cette thèse.

TABLE DE MATIÈRES

Introduction globale	13
1 Le vent : Contexte général	17
1.1 Introduction	19
1.2 Les enjeux du vent	21
1.2.1 Hygiénisme / Salubrité	21
1.2.2 Confort thermique	22
1.2.3 Confort mécanique/aéroulque et lien avec les formes urbaines	24
1.3 L'intérêt de représenter le vent	25
1.3.1 Pourquoi?	25
1.3.2 Pour qui?	32
1.3.3 Où?	34
1.3.3.1 À l'intérieur des bâtiments	34
1.3.3.2 Dans l'espace public	34
2 Visualisations et représentations courantes du vent	39
2.1 Introduction	41
2.2 Représentations visuelles et audiovisuelles de la présence du vent	41
2.2.1 Photographie / peinture	41
2.2.2 Synthèse d'images	42
2.2.3 Cinéma	47
2.2.4 Suggestion de la matérialisation du flux du vent	48
2.3 Visualisations du vent en architecture et ingénierie	51
2.3.1 Suggestions visuelles des propriétés du vent	51
2.3.2 Visualisations scientifiques du flux du vent sur des modèles physiques	56
2.3.3 Visualisations scientifiques (numériques) du flux du vent	57
2.3.3.1 Visualisations traditionnelles	59
2.3.3.2 Visualisation illustrative	62

2.3.4	Animations basées sur les représentations scientifiques	65
3	Restitutions tactiles du vent en réalité virtuelle	71
3.1	Le contexte de la réalité virtuelle	73
3.1.1	Nature de l’environnement virtuel	74
3.1.2	Immersion et interaction	75
3.1.3	Étapes de la démarche de conception d’un système de RV	79
3.1.4	La présence en RV	79
3.1.4.1	Mesures subjectives	80
3.1.4.2	Mesures physiologiques	80
3.1.4.3	Mesures comportementales	80
3.2	La réalité virtuelle en architecture et urbanisme	81
3.3	Visualisations de l’écoulement du vent en réalité virtuelle	83
3.4	Représenter le vent par le toucher en réalité virtuelle	85
4	Problématique et cadre expérimental	95
4.1	Introduction	97
4.2	Problème	97
4.3	Hypothèses	98
4.4	Objectifs	100
4.5	Dispositif expérimental	100
4.5.1	Ventilateurs utilisés	101
4.5.2	Contrôle numérique des ventilateurs	105
4.6	Design des expériences	105
5	Première expérience : perception d’une représentation multisensorielle du vent en réalité virtuelle	109
5.1	Objectif	111
5.2	Scène Virtuelle	111
5.2.1	Restitution tactile et sonore	114
5.2.2	Représentation visuelle du flux du vent	115
5.3	Conditions expérimentales	117
5.4	Hypothèses	118
5.5	Procédure	120
5.6	Résultats	121

5.6.1	Analyses statistiques	122
5.6.2	Direction du vent	122
5.6.3	Force du vent	123
5.6.4	Sentiment de présence	124
5.7	Discussion	125
5.8	Limites et perspectives	126
5.9	Conclusion	128
6	Deuxième expérience : Perception de l'estimation de la force du vent par rapport à l'échelle de Beaufort	129
6.1	Objectif	131
6.2	Maquette numérique	131
6.3	Conditions expérimentales	131
6.4	Hypothèses	136
6.5	Procédure	137
6.6	Résultats	137
6.6.1	Analyses statistiques	140
6.6.2	Force du vent	141
6.6.3	Direction du vent	143
6.7	Discussion	145
6.8	Limites et perspectives	147
6.9	Conclusion	148
7	Discussion et perspectives	149
7.1	Les expressions du vent	151
7.1.1	Suggestion de la présence du vent par ses effets mécaniques sur les éléments du contexte	151
7.1.2	Visualisation de l'écoulement du vent	152
7.1.3	Restitution tactile du vent	154
7.2	Interfaces sensorielles	156
7.2.1	Projection de la scène virtuelle	156
7.2.2	Taille et localisation des ventilateurs	157
7.2.3	Écouteurs avec l'option d'annulation de bruit	160
7.3	Potentiel dans la représentation des ambiances urbaines	161

TABLE DE MATIÈRES

Conclusion globale	165
Bibliographie	169
Table des figures	187
Liste des tableaux	189

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La réalité virtuelle (RV) a montré son potentiel dans le domaine de l'architecture et de l'aménagement urbain grâce à sa capacité à permettre l'immersion des utilisateurs dans un modèle 3D (PAES et al., 2017), entre autres. Au-delà des aspects esthétiques, la RV a le potentiel de représenter des phénomènes physiques et sensibles, ce qui est approprié pour la représentation des ambiances d'un lieu. Dans des recherches précédentes, VIGIER et al. (2013) ont montré comment suggérer différentes situations climatiques en utilisant des changements de couleur et de contraste dans une scène virtuelle urbaine. TAHRANI et MOREAU (2008) ont étudié la relation entre l'éclairage naturel, l'espace et la perception humaine en RV à partir d'une comparaison entre une rue réelle et sa reproduction dans une scène virtuelle. Dans la présente recherche, nous nous intéressons à la représentation du vent qui joue un rôle important en termes de santé, de confort thermique et mécanique des usagers de l'espace architectural et urbain (GANDEMER, 1978).

En effet, le vent peut modifier la perception d'un espace et la façon dont il sera utilisé au quotidien. Cependant, sa représentation dans le projet architectural et urbain est actuellement limitée à des expressions visuelles accompagnées de valeurs quantitatives, laissant de côté les propriétés sensibles du phénomène. BERGER et CRISTIE (2015) ont exploré une représentation de la dynamique des fluides computationnelle (*computational fluid dynamics*, CFD) dans la RV afin de combler le fossé entre les architectes et les ingénieurs dans ce contexte et de permettre un travail collaboratif. Ils ont présenté une animation montrant une façon d'exprimer les propriétés du vent. Cependant, cette représentation reste une visualisation de l'écoulement du vent qui ne donne pas à percevoir ses propriétés sensibles.

En examinant la manière dont le vent est exprimé dans d'autres disciplines, nous trouvons des éléments qui permettent d'exploiter les qualités sensibles du phénomène, en s'approchant de la perception du vent en situation réelle. Par exemple, dans certaines représentations artistiques, le vent est manifesté par ses effets mécaniques sur les éléments du contexte. En plus d'exprimer sa présence, ces représentations permettent de donner une idée des propriétés du vent, telles que sa direction et son intensité. Cette suggestion permet d'associer l'information aux expériences vécues précédemment et ainsi de donner

une idée du comportement du vent sans avoir recours à des données quantitatives.

Un autre exemple se trouve dans les représentations en réalité virtuelle. Dans ces systèmes, en plus d'utiliser les expressions audiovisuelles du vent sur les éléments du contexte, ou les visualisations de l'écoulement du vent, il est possible d'inclure la restitution tactile du vent à l'aide de systèmes mécaniques comme des ventilateurs ou des jets d'air comprimé. Les études précédentes (LEHMANN et al., 2009; MOON et KIM, 2004; RIETZLER et al., 2017; VERLINDEN et al., 2013) ont montré que cela permet d'augmenter le sentiment de présence dans la scène virtuelle.

C'est pourquoi nous nous intéressons dans cette recherche à la représentation sensible du vent dans un dispositif de réalité virtuelle. A cet effet, Nous avons équipé la salle de RV de l'École Centrale de Nantes d'un groupe de ventilateurs commandés numériquement.

Nous avons conçu et mis en œuvre deux études utilisateurs différentes à l'aide de notre dispositif expérimental. Dans la première, nous avons cherché à comparer différentes représentations du vent en RV, en nous basant sur les résultats d'une simulation CFD, afin d'identifier leurs effets sur la compréhension des propriétés du vent et sur le sentiment de présence dans la scène. Quatre représentations différentes du vent ont été présentées aux participants : (I) la représentation audiovisuelle des effets mécaniques du vent sur les éléments du contexte, (II) l'ajout de la visualisation du flux du vent à (I), (III) l'ajout de la restitution tactile à (I), et enfin, (IV) toutes ces représentations conjuguées (voir le chapitre 5).

Dans la seconde expérience, nous avons évalué la perception de la force du vent et sa direction comparativement aux indices visuels de l'échelle de Beaufort. Nous avons analysé l'incidence de la direction du vent et la suggestion visuelle de ses effets mécaniques sur la perception de deux valeurs différentes de force du vent (cf. chapitre 6).

Nous explorons une nouvelle façon de communiquer les effets du vent, en les associant aux résultats d'une simulation CFD, afin de suggérer la présence du vent et son incidence dans la scène de réalité virtuelle.

Ce document est structuré comme suit. Dans le chapitre 1, nous mettons en évidence les vertus du vent sous différents aspects, son importance et les raisons pour lesquelles nous considérons qu'il est pertinent d'explorer sa représentation dans les projets urbains et architecturaux. Ensuite, dans le chapitre 2 nous présentons un inventaire des représentations visuelles et audiovisuelles du vent trouvées tant dans des expressions artistiques que dans des représentations techniques. Dans le chapitre 3, nous présentons la réalité virtuelle de manière générale et nous mettons en contexte les travaux précédents sur la

restitution tactile du vent en RV et leur influence sur notre prototype. Dans le chapitre 4, nous exposons nos questionnements, hypothèses et objectifs ainsi que la description de notre dispositif expérimental. Dans le chapitre 5 et dans le chapitre 6, nous décrivons nos deux expériences d'études utilisateur pour évaluer la perception du vent ainsi que leurs hypothèses et résultats. Finalement, nous discutons les contributions de cette recherche, ainsi que ses limites et perspectives dans le chapitre 7. Une conclusion générale résume la démarche et les résultats de la thèse.

LE VENT : CONTEXTE GÉNÉRAL

Sommaire

1.1	Introduction	19
1.2	Les enjeux du vent	21
1.2.1	Hygiénisme / Salubrité	21
1.2.2	Confort thermique	22
1.2.3	Confort mécanique/aéroulique et lien avec les formes urbaines	24
1.3	L'intérêt de représenter le vent	25
1.3.1	Pourquoi?	25
1.3.2	Pour qui?	32
1.3.3	Où?	34
1.3.3.1	À l'intérieur des bâtiments	34
1.3.3.2	Dans l'espace public	34

1.1 Introduction

Le vent est défini comme le mouvement d'un volume d'air qui se déplace d'une zone de haute pression atmosphérique vers une zone de basse pression (LAROUSSE, p. d.). Cette instabilité de pressions est due principalement à des différences thermiques liées à l'échauffement inégal des masses terrestres. Le « vent » est le nom adopté tant dans le langage courant que scientifique pour définir le déplacement horizontal de l'air (MÉTÉO-FRANCE, p. d.). Il est caractérisé par une direction, une vitesse et une fréquence, qui sont habituellement représentées graphiquement par des roses des vents ou des cartes des conditions de vent. Il existe des outils tels que les anémomètres pour collecter ces données quantifiables. Selon leur complexité, ils permettent de mesurer la vitesse, la pression et la direction du vent. La direction du vent peut être indiquée par les girouettes et les manches à air, ces dernières donnent aussi une idée approximative de sa vitesse (voir la Figure 1.1).

Le vent (à proprement parler les gaz dont il est composé) est transparent, il est lui-même imperceptible à nos yeux, sauf dans les cas où il est pigmenté, comme par exemple, par la pollution. Pourtant nous sommes conscients de sa présence, nous le percevons par le toucher quand il entre en contact avec nos capteurs corporels. Le phénomène de convection conduit à des échanges énergétiques entre lui et notre corps, en fonction des différences thermiques (GANDEMER, 1992), c'est-à-dire que nous gagnons ou perdons de la chaleur à son contact. Nous le percevons aussi par l'ouïe, lorsqu'il rencontre des obstacles ou un changement de formes et dimensions dans son environnement de propagation et que sont ainsi générées des vibrations à des fréquences perceptibles par l'homme. De même, on peut le percevoir par la vue quand les objets, voire les personnes sont soumises à son influence. Il fait bouger les plantes, les drapeaux, les rideaux, etc. Il peut fortement affecter notre façon de nous habiller, nos activités, notre comportement dans un environnement, la façon dont nous percevons l'espace et donc la façon dont nous l'habitons.

La prise en compte du vent dans les champs de l'ingénierie, de l'architecture et de l'urbanisme se fait au niveau tant constructif et structurel que perceptif et comportemental. Au niveau constructif, l'influence du vent est prise en compte dans les calculs structuraux, elle peut donc affecter les dimensions, les systèmes constructifs et la morphologie même des structures en raison des efforts considérables exercés sur l'ensemble des éléments. Un exemple est le dimensionnement des ponts ou des tours de grande hauteur, dont l'incidence du vent est réglementée par la norme EN 1991-1-4 : 2005 (AFNOR, 2005).

Néanmoins, son impact sur les occupants de l'espace n'est pas toujours pris en compte

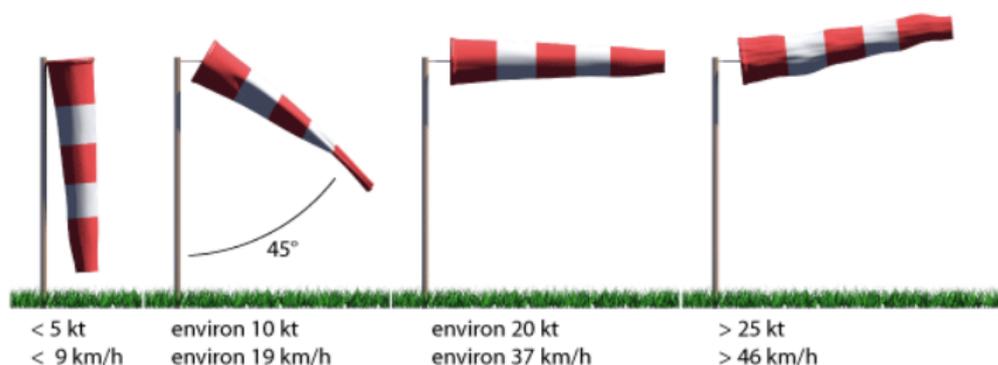


FIGURE 1.1 – Vitesse du vent indicative par la manche à air (MÉTÉO-FRANCE, p. d.)

dans les domaines sensibles de l'architecture et de l'urbanisme. La prise en compte du vent reste ainsi parfois limitée à quelques exigences normatives liées à la nécessité de faire communiquer un espace intérieur avec l'extérieur et permettre la circulation et le renouvellement de l'air. Le chapitre II du « Code du travail » (2008) (Aération, assainissement), énonce les besoins de ventilation dans les établissements de travail et l'arrêté du 24 mars 1982 concerne l'aération des logements. Malgré son importance, cela ne suffit pas à prendre en compte toutes les dimensions et enjeux du vent au moment de concevoir et habiter un projet. Ses avantages et propriétés sont souvent sous-exploités ou omis, ce qui provoque parfois l'utilisation de systèmes mécaniques d'injection, d'extraction ou de climatisation d'air, des endroits surexposés au vent où certaines activités propres du lieu ne peuvent pas être développées ou, a contrario, des espaces avec des entrées d'air insuffisantes pour garantir le débit minimum d'air requis (abordé dans la section 1.2).

Nous présentons ci-dessous les enjeux du vent (section 1.2) en termes d'impacts sur la santé, et d'incidence sur le confort (thermique et mécanique) des usagers d'un espace. Ensuite, nous nous concentrons sur l'intérêt de représenter ce phénomène (section 1.3). Afin d'orienter la suite de notre recherche, nous nous questionnons sur le type d'audience que nous prévoyons de cibler pour étudier les représentations (professionnels/grand public) et le type d'espaces (intérieur/extérieur) à considérer.

1.2 Les enjeux du vent

1.2.1 Hygiénisme / Salubrité

Lors de la révolution industrielle, le déplacement des personnes des zones rurales vers les villes s'est intensifié et a mis en évidence des problèmes liés aux conditions des habitats existants et à la salubrité publique. Le surpeuplement, la proximité avec les industries, les conditions inappropriées de qualité de l'air, les ambiances humides et les déchets putrides ont alerté les hygiénistes de l'époque sur la nécessité d'agir contre les maladies (LEVY, 2014). L'objectif principal était alors de purifier l'air et l'eau corrompus. Néanmoins, malgré les efforts au niveau de l'aménagement urbain, les maladies ont continué à se propager. C'est par la révolution pasteurienne que la plupart des germes ont été découverts et que les propriétés curatives du soleil, de la lumière et du vent sont mises en avant pour contrer l'accumulation et propagation des micro-organismes dans les environnements habitables par les êtres humains (LEVY, 2014).

Le vent permet de renouveler le volume d'air des espaces et permet d'évacuer les polluants de diverses origines. Parmi eux, les éléments biologiques provenant des animaux, végétaux et moisissures et les éléments chimiques tels que des résidus de produits ménagers, peintures, matériaux de construction, activités de bricolage, processus de combustion, entre autres. Ces polluants affectent la santé, même lorsque les normes sont respectées, à court et à long terme. Leurs effets sont plus notables sur les enfants et les personnes âgées (HOST et TELLE-LAMBERTON, 2014).

Le débit d'air requis dans un espace pour garantir sa qualité dépend du type d'activités qui s'y déroulent, du nombre d'occupants, de leur métabolisme et de la taille de l'espace. Il est souvent réglementé par des standards établis pour le dimensionnement et l'installation des équipements de ventilation et climatisation mécanique de l'air, tel que l'ASHRAE (2007) (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). Ils prennent en compte les activités dans les espaces, la quantité d'air requis par occupant, par mètre carré d'espace et par unité de temps. Dans certains cas tels que les parkings, le débit n'est calculé que par rapport à la taille de l'espace, néanmoins le volume d'air à renouveler requis est considérablement plus grand que dans un espace habité du fait de la pollution qui y est concentrée et ses risques pour la santé humaine.

Il existe deux grandes stratégies de renouvellement naturel de l'air. La première est l'extraction naturelle d'air par le tirage thermique (BANSAL et al., 1993). Elle consiste à profiter de la hauteur de l'espace et des différences thermiques et de pressions entre



FIGURE 1.2 – (a) tirage thermique (*Stack effect*) et (b) ventilation croisée (SØRENSEN, 2009 cité par WIDERA, 2014)

l'intérieur et l'extérieur. L'air froid de l'extérieur, plus dense, descend vers l'intérieur et l'air chaud contenu à l'intérieur est expulsé, suivant le même mécanisme de fonctionnement que les cheminées (voir la Figure 1.2a). La deuxième stratégie est la ventilation croisée, qui utilise le vent et ses propriétés comme moteur naturel de renouvellement d'air. Elle consiste à mettre en relation des entrées et sorties d'air soumises à des pressions différentes, favorisant l'écoulement naturel du vent (voir la Figure 1.2b). Cette stratégie est plus efficace car, en profitant des propriétés du vent, le volume d'air requis peut entrer plus rapidement dans l'espace et cela se traduit par des ouvertures de taille plus réduite dans les surfaces des projets architecturaux.

1.2.2 Confort thermique

En plus de ses propriétés hygiénistes, le vent peut modifier fortement le comportement thermique tant des espaces intérieurs qu'extérieurs. Comme nous l'avons évoqué antérieurement, il peut faciliter l'évacuation de l'air chaud des espaces (chaleur produite par les occupants et les équipements électromécaniques, les gains solaires) sans besoins énergétiques supplémentaires. Les gains provenant de l'extérieur sont liés notamment aux apports solaires incidents sur les surfaces et cette énergie est transmise à l'espace par conduction, rayonnement et convection à une vitesse variable en fonction de la capacité de transmission thermique de chaque matériau. La chaleur reçue par une surface vitrée sera donc transmise beaucoup plus vite à l'intérieur que celle captée par une paroi en béton.

En plus de la chaleur contenue dans l'air, le vent entraîne par le phénomène de convection l'énergie stockée dans les matériaux des différentes surfaces par leur inertie thermique. Ce qui est très utile pour évacuer la chaleur (quand il n'est pas nécessaire de la conserver) des grandes surfaces qui représentent la plus grande masse d'accumulation d'énergie

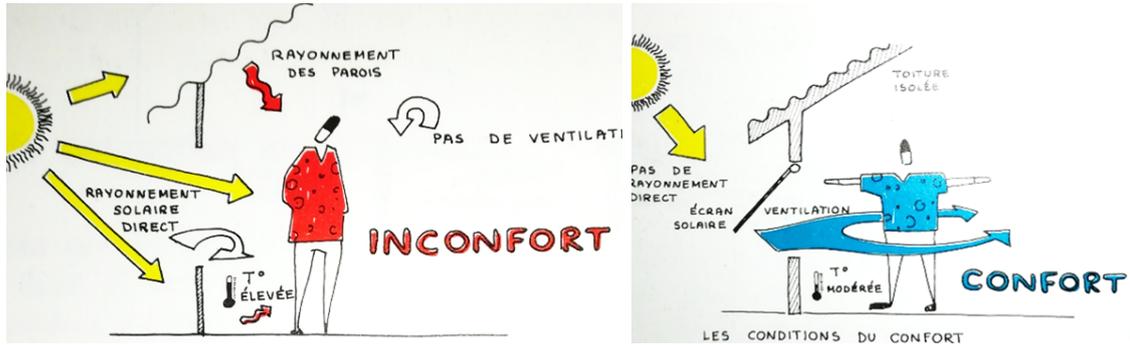


FIGURE 1.3 – Schéma des stratégies de masque solaire et de ventilation naturelle pour le contrôle du confort thermique en climat tropical humide (GANDEMER, 1992).

dans un espace, c'est-à-dire les toits et les sols. Cela permet de réguler la température d'un espace et éviter la surchauffe. De même, le vent modifie les échanges énergétiques entre l'air et nos corps, ce qui altère notre perception et donc notre confort thermique, c'est-à-dire l'équilibre thermique avec l'environnement. « L'enjeu de la ventilation est, par conséquent, considérable puisqu'elle permet à elle seule d'obtenir une situation de confort dans un local bénéficiant par ailleurs d'une bonne protection solaire » (GANDEMER, 1992, p. 35) (voir la Figure 1.3).

Dans la méthode de calcul du confort thermique de FANGER (1973), la vitesse du vent est l'une des variables avec la température de l'air, la température rayonnante des surfaces, l'humidité relative, le métabolisme des occupants et leurs vêtements. Ces variables permettent de calculer les indices PMV (*Predicted Mean Vote*) et PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). C'est-à-dire que si dans deux environnements aux conditions identiques, les vitesses de vent sont différentes, cela peut entraîner un résultat différent en termes de confort thermique et conduire à des perceptions différentes par les occupants de ces espaces.

Un autre indice, qui prend en compte le vent pour calculer le confort attendu pour les usagers et qui est plus adapté aux environnements extérieurs, est le PET (*Physiologically Equivalent Temperature*) (HÖPPE, 1999). Il prend en compte les divers facteurs climatiques (tels que l'humidité de l'air et la vitesse du vent) et les éléments qui influencent le bilan thermique humain tels que l'activité métabolique et la résistance aux échanges énergétiques résultant des vêtements dans des situations typiques intérieures. Ensuite il fait une équivalence avec les situations extérieures. Ces indices montrent le potentiel du vent à affecter le confort des occupants d'un espace.



FIGURE 1.4 – Difficultés à marcher dues aux effets mécaniques du vent (SACRÉ et GANDEMER, 1993).

1.2.3 Confort mécanique/aéroulque et lien avec les formes urbaines

Au-delà des échanges énergétiques et des sensations thermiques générées par la présence et la vitesse du vent, celui-ci peut affecter le déroulement normal des activités dans un lieu à cause de sa puissance et du temps d'exposition. Il peut se traduire par des feuilles qui volent dans les bureaux, des gobelets qui tombent sur les terrasses, des parapluies qui se retournent dans la ville et même la difficulté, voire l'impossibilité, de marcher dans quelques rues surexposées au vent (voir la Figure 1.4).

Ces effets peuvent être prévus, réduits ou même amplifiés en fonction des choix architecturaux et urbains et de leurs résultats bâtis (GANDEMER, 1994). Les formes des constructions dans la ville affectent donc le comportement du vent et produisent différents effets (voir la Figure 1.5). L'écoulement du vent est affecté par les différents obstacles qu'il trouve sur son chemin. Ils exercent une force de friction qui diminue sa vitesse. Leurs influences sur le vent sont liées à la rugosité des éléments vues à différentes échelles (GANDEMER, 1994). On peut donc parler de la rugosité de la ville en fonction de sa densité et de ses formes urbaines, la rugosité d'une rue ou même la rugosité des matériaux. La vitesse du vent varie s'il s'exerce sur un espace végétalisé, sur une rue en bitume ou sur

une surface d'eau, et c'est cette dernière qui s'oppose le moins au déplacement du vent et permet donc des incréments dans sa vitesse. La disposition d'éléments sur le contexte, peut aussi produire une augmentation de la vitesse du vent, comme c'est le cas pour l'effet Venturi (voir la Figure 1.5).

La force d'incidence du vent peut être décrite par l'échelle de Beaufort (voir le Tableau 1.1), où chaque valeur correspond à des seuils de vitesses et des effets produits sur les objets, personnes et environnements tant maritimes que terrestres (nous présentons uniquement les effets sur terre dans le Tableau 1.1).

En plus de la force du vent, la fréquence d'exposition au dépassement des vitesses admissibles joue un rôle important sur la perception des usagers de l'espace. FAURE et FLAMAND (2009), au sein du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), ont montré qu'il existe différents niveaux de tolérance face aux pourcentages d'exposition au vent en fonction du type d'activité (voir le Tableau 1.2). SZUCS (2005) définit une zone de confort aérothermique délimitée par des critères tant thermiques que mécaniques. La Figure 1.6 montre la valeur maximale de vitesse de vent de $3.6m/s$ qui marque la limite conventionnelle de la gêne mécanique. Au-delà de cette valeur, le vent produit de l'inconfort. En dessous de $4^{\circ}C$, la limite supérieure de la vitesse admissible du vent est plus basse, car elle peut produire un inconfort au niveau thermique. De même, mais dans le sens inverse, au-dessus de $26^{\circ}C$, la limite inférieure de la vitesse du vent admissible est augmentée.

1.3 L'intérêt de représenter le vent

1.3.1 Pourquoi ?

Le vent joue un rôle important dans nos perceptions d'un espace et même sur notre santé. Son incidence directe sur un environnement peut définir l'acceptation ou le refus des usagers de l'espace (LECORRE, 1998). De plus, comme vu précédemment dans les espaces intérieurs, une ventilation correcte aide à évacuer la chaleur et les agents polluants, favorisant des réductions dans la consommation énergétique et la prévention du « syndrome du bâtiment malsain » (BURGE, 2004). Néanmoins, il n'est pas toujours pris en compte lors de la mise en place des projets urbains et architecturaux.

L'absence de prise en compte des conditions climatiques propres de l'environnement d'implantation d'un projet dans le processus de conception se traduit par des problèmes

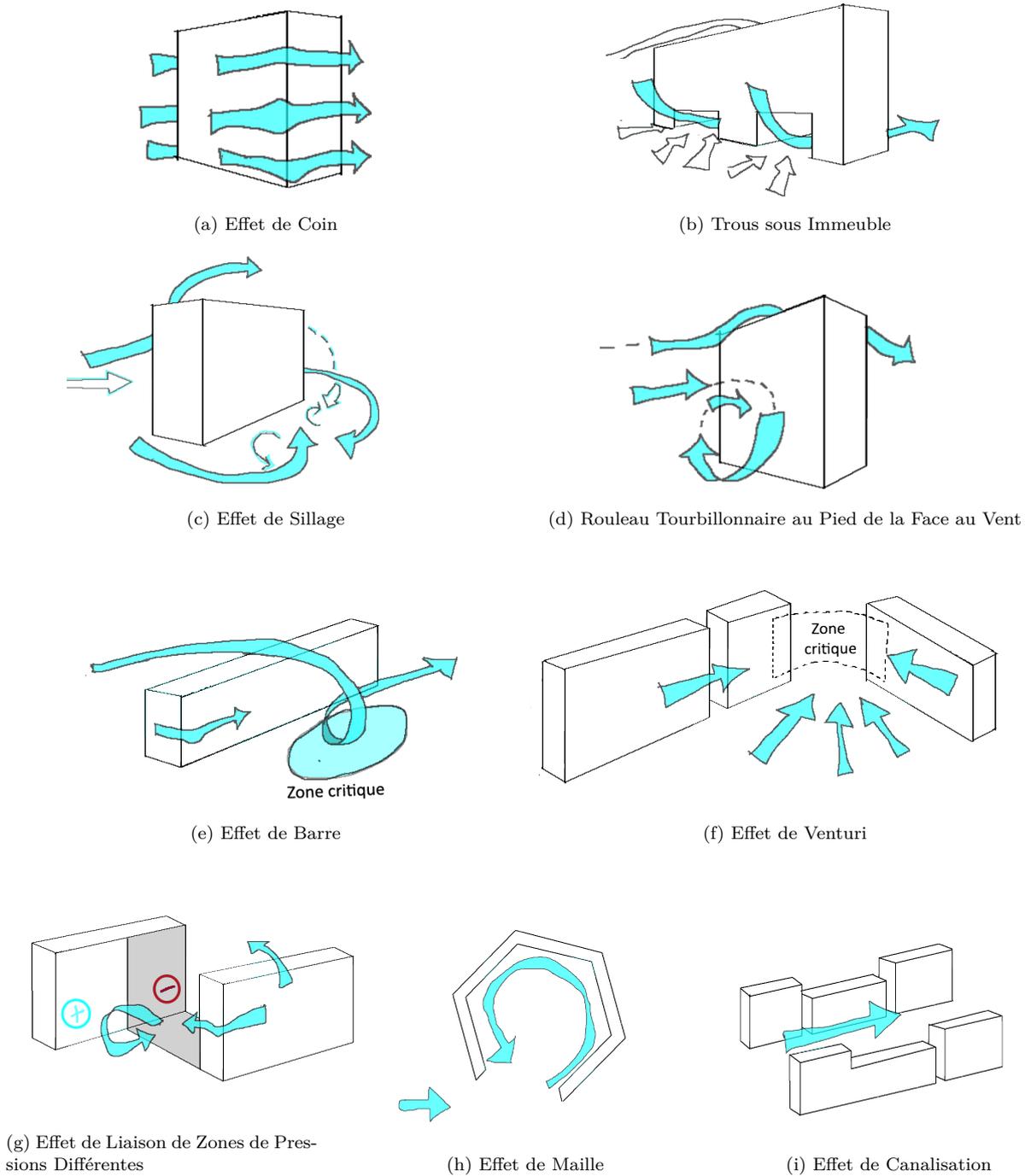
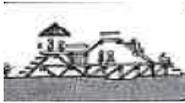
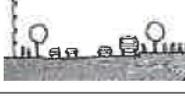


FIGURE 1.5 – Représentation visuelle de quelques effets aérodynamiques types, basés sur GANDEMER (1994).

TABLE 1.1 – Échelle de Beaufort - Effets observables sur terre. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Échelle_de_Beaufort)

Degré	Termes	km/h	Effets à terre
0	Calme	< 1	La fumée monte verticalement. Les feuilles des arbres ne témoignent d'aucun mouvement.
1	Très légère brise	1-5	La fumée indique la direction du vent. Les girouettes ne s'orientent pas.
2	Légère brise	6-11	On sent le vent sur le visage. Les feuilles s'agitent. Les girouettes s'orientent.
3	Petite brise	12-19	Les drapeaux flottent au vent. Les feuilles sont sans cesse en mouvement.
4	Jolie brise	20-28	Les poussières s'envolent. Les petites branches plient.
5	Bonne brise	29-38	Le tronc des arbustes et arbrisseaux en feuilles balance. La cime de tous les arbres est agitée. Des vaguelettes se forment sur les eaux intérieures.
6	Vent frais	39-49	On entend siffler le vent. Les branches de large diamètre s'agitent. Les parapluies sont susceptibles de se retourner.
7	Grand frais	50-61	Tous les arbres balancent. La marche contre le vent peut devenir difficile.
8	Coup de vent	62-74	Les branches sont susceptibles de casser. La marche contre le vent est très difficile, voire impossible.
9	Fort coup de vent	75-88	Le vent peut légèrement endommager les bâtiments : envols de tuiles, d'ardoises, chutes de cheminées.
10	Tempête	89-102	Dégâts importants aux bâtiments. Les toits sont susceptibles de s'envoler. Certains arbres sont déracinés.
11	Violente tempête	103-117	Ravages étendus et importants.
12	Ouragan	>118	Dégâts très importants de l'ordre de la catastrophe naturelle.

TABLE 1.2 – Fréquences de gêne maximales admissibles en fonction des types d'activités (FAURE et FLAMAND (2009)).

Activités		Limite supérieure de la gêne pour inconfort convenable (en pourcentage du temps annuel)
STATION IMMOBILE PROLONGÉE - Terrasse de café, théâtre en plein air, piscine, etc.		Quelques pour cent
STATION IMMOBILE DE COURTE DURÉE - Jardin public, aire de jeux, rue commerçante, galerie, etc.		5%
MARCHE NORMALE - Promenade pédestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble, etc.		10%
MARCHE RAPIDE - Parc auto, trottoir des avenues, belvédère, etc.		20%

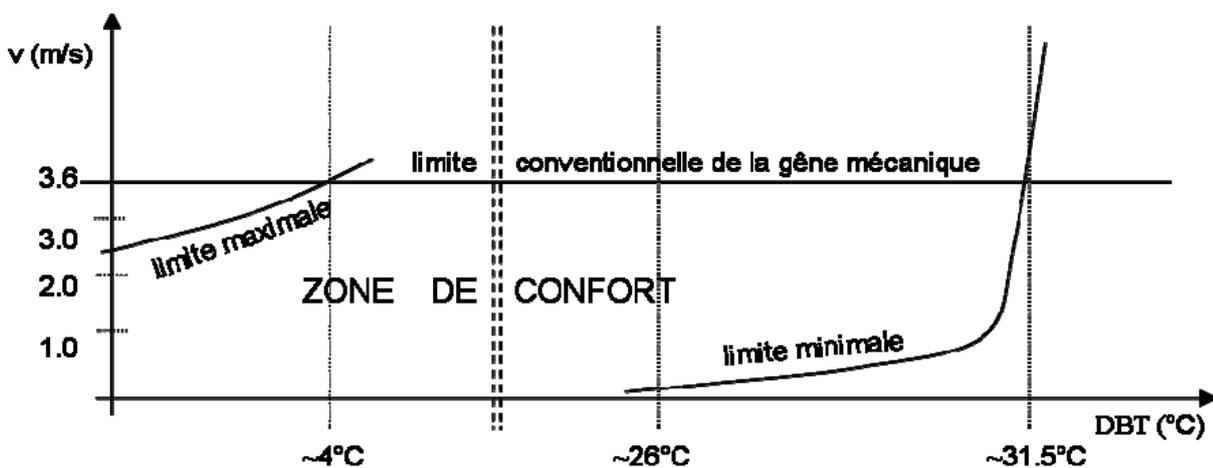


FIGURE 1.6 – Zone de confort aérothermique (SZUCS, 2005).

dans le déroulement des activités des occupants de l'espace une fois aménagé et construit. Ces problèmes peuvent être en partie résolus de deux façons différentes. La première consiste à ajouter des équipements mécaniques, ce qui suppose des surcoûts à court terme dans l'achat et l'installation des équipements, et d'autres à moyen et long terme dans leur consommation énergétique. La deuxième manière est d'utiliser les facultés et conditions de l'environnement pour agir, de façon naturelle, sur les problèmes engendrés. Cette approche est mise en œuvre par des bureaux d'études spécialisés dans le développement durable et plus spécifiquement dans l'architecture dite bioclimatique. Pour ce faire, ils prennent en compte l'incidence solaire, l'enveloppe du bâtiment, la conservation ou l'évacuation de l'énergie, la lumière et le vent. Ces stratégies supposent aussi un surcoût à court terme dans l'installation des dispositifs requis pour adapter les constructions, néanmoins, il y a un retour économique à moyen et long terme grâce aux économies énergétiques. Pourtant ces stratégies, si elles ne sont pas pensées à l'origine du projet, peuvent avoir pour résultat des ajouts qui pourraient être invasifs ou contraires aux résultats esthétiques recherchés par le concepteur.

En plus des interventions correctives faites après la finalisation du projet, il y a deux autres moments où les stratégies bioclimatiques sont mises en œuvre. Le premier est dans l'étape de conception où le projet est déjà constitué sur les plans, c'est-à-dire que la phase de planification est finalisée. Les stratégies bioclimatiques arrivent comme des interventions correctives sur le projet architectural, ce qui implique un dialogue voire une négociation avec le concepteur pour lui expliquer l'importance d'ajouter ou de supprimer des éléments pour améliorer les conditions du confort thermique ou aérodynamique dans les espaces conçus. Ces éléments ont des impacts morphologiques et visuels sur la conception initiale du concepteur, c'est pourquoi il faut chercher un point d'équilibre entre ces facteurs esthétiques et sensibles. Le deuxième moment de mise en œuvre des concepts bioclimatiques est à l'origine du projet, avant même de préétablir une proposition formelle. C'est le moment idéal car ce sont les conditions de l'environnement même qui donnent des pistes pour agir sur une forme, une orientation ou une matérialité spécifique. A ce moment-là, le projet lui-même et ses composants répondent aux conditions environnementales. Les éléments pour profiter des conditions du lieu naissent avec le projet et ne sont pas invasifs ou contradictoires avec la proposition formelle du projet. Les interventions ne sont pas correctives, elles accompagnent le projet pendant tout le processus de conception jusqu'à son utilisation (voir la Figure 1.7).

Parmi les diverses variables prises en compte pour un projet bioclimatique, nous nous

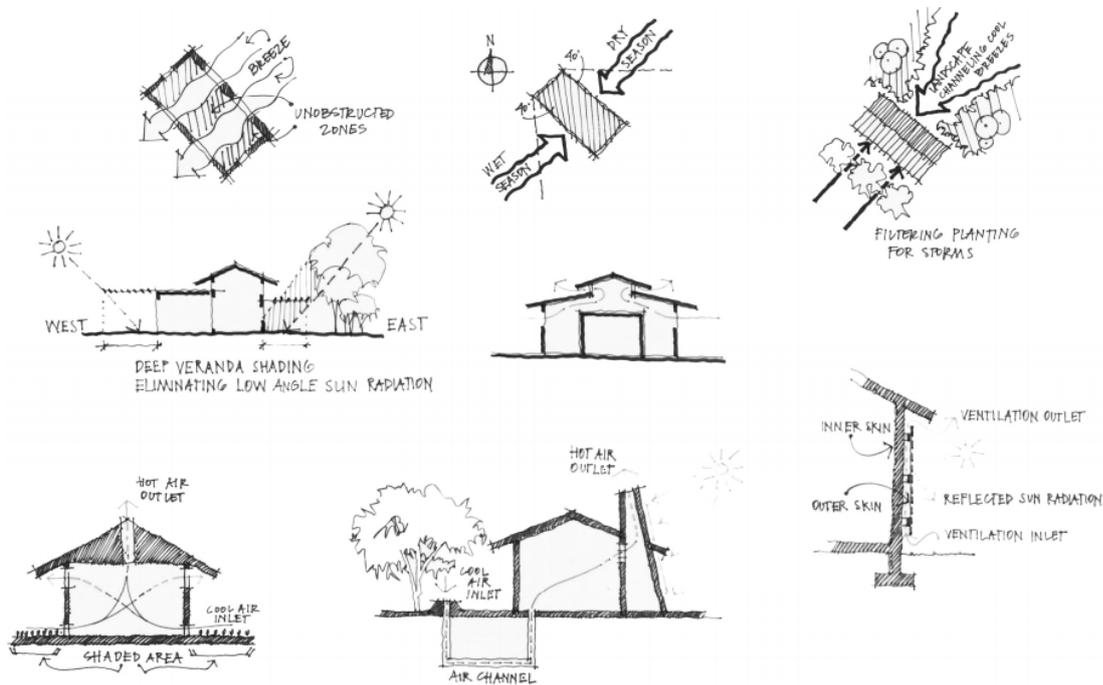


FIGURE 1.7 – Schéma des principes des stratégies bioclimatiques (ȚUNDREA et BUDESCU, 2013).

focalisons ici sur le vent et sa représentation. Il existe des représentations caractéristiques de chaque étape de mise en œuvre des stratégies.

A l'origine du projet, les cartes et roses des vents aident à comprendre graphiquement le comportement et l'intensité du vent sur son site d'implantation, cela permet de définir les zones de pressions et de dépressions et appuyer des choix initiaux de conception. Les simulations de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sont éventuellement utilisées à l'origine du projet pour diagnostiquer le comportement du vent en fonction de l'environnement bâti. Au moment d'appliquer des stratégies de ventilation sur les projets architecturaux et urbains en étape de conception ou déjà construits, il est habituel d'établir des schémas du comportement du vent pour communiquer sa présence, ses principes d'interactions avec le bâti existant. C'est une façon de traduire visuellement les choix résultants quant à l'emplacement, la disposition et les dimensions des entrées ou sorties d'air. Le vent est alors représenté par des flèches qui traduisent sa direction et des couleurs qui expriment les différences de température de l'air (voir la Figure 1.8, sujet approfondi dans la section 2.3).

L'autre type de représentation du vent souvent trouvé dans les projets architecturaux et urbains, est lié aux visualisations issues des simulations CFD. Ces visualisations, qui

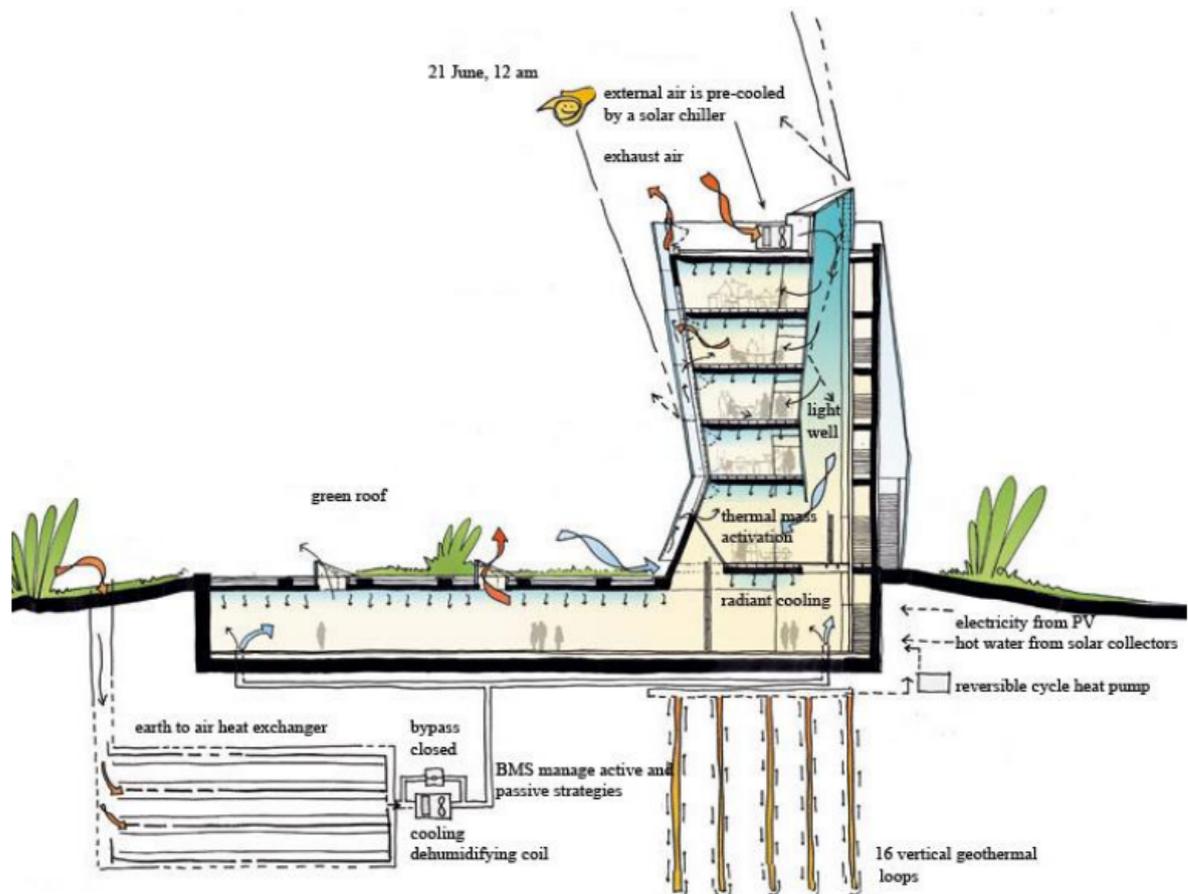


FIGURE 1.8 – Principe de ventilation du *Centre for Sustainable Energy Technologies* (CSET, 2006-2008, Ningbo, China), pour *MCA, environmental strategies*, cité par WIDERA (2014).

peuvent être statiques ou dynamiques, donnent un résultat du comportement du vent selon les différentes variables morphologiques et atmosphériques du contexte numérisé. Elles servent à comprendre et quantifier le comportement du vent dans un lieu existant, et à valider les choix faits pour les projets ou les modifications à venir.

1.3.2 Pour qui ?

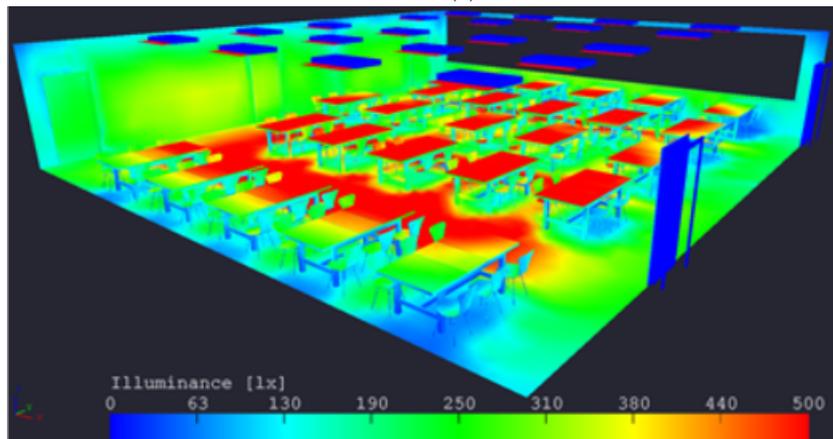
Les représentations précédemment présentées sont des données d'entrées pour la communication, la prise de décisions et l'évolution d'un projet, faits par et pour des professionnels. Pour la diffusion du projet au grand public, aux possibles futurs usagers qui devront vivre les résultats des choix faits au moment de la conception, il n'y a pas, d'après notre expérience, de représentations spécifiques de l'incidence du vent sur l'espace qu'ils vont habiter. Souvent la communication sur le projet se fait à l'aide d'images statiques ou dynamiques qui tentent de recréer le résultat visuel et formel de l'espace pensé par le concepteur. Les éléments tel que le vent, qui ont pu jouer un rôle important dans le déroulement du projet, pas uniquement au niveau morphologique mais aussi dans le champ perceptif et le confort des futurs occupants de l'espace, ne sont pas toujours exprimés. Parfois, quand cette information est transmise aux utilisateurs, elle n'est pas adaptée au public car elle reprend les représentations utilisées pendant le développement du projet, c'est-à-dire les schémas du comportement du vent et les résultats des simulations CFD destinés aux professionnels.

Les représentations du phénomène du vent pour le grand public ne devraient-elles pas être différentes de celles destinées aux concepteurs ? En plus de clarifier ou justifier une décision formelle sur le projet, ces représentations devraient apporter d'autres éléments permettant à chacun de saisir les effets potentiels du vent dans le futur projet. On peut ici faire une analogie avec les représentations de l'éclairage naturel ou artificiel qui mettent en œuvre à la fois des dimensions techniques du projet à travers des simulations numériques, et des dimensions plus sensibles à travers les images de synthèse afin de stimuler les perceptions et sensations des futurs usagers (voir la Figure 1.9). Nous pouvons ainsi imaginer des représentations du vent qui auraient pour finalité de stimuler la perception sensible des usagers. Elles pourraient être produites pour servir d'outil de médiation pour les concepteurs et être validées et nourries par le retour d'expérience des usagers.

C'est dans cette perspective que nous nous intéressons aux représentations du vent destinées aux usagers d'un espace plus qu'aux concepteurs. De telles représentations peuvent être basées sur des résultats de simulations numériques, sur des perceptions quantitatives



(a)



(b)

FIGURE 1.9 – (a) Représentation qualitative et (b) quantitative de la simulation d'éclairage d'un espace. Source image : <http://www.greenbim-eng.com>

et qualitatives, afin de compléter les représentations du vent existantes. Nous cherchons ainsi à communiquer le vent comme le phénomène physique qu'il est, mais aussi à exploiter ses facultés sensibles pour donner des perceptions d'ambiance, tenter de transmettre un possible ressenti d'un projet à venir ou essayer de simuler et de communiquer des perceptions existantes dans un projet habité.

1.3.3 Où ?

Les enjeux du vent exposés précédemment peuvent être développés à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments. Nous exposons dans la suite la différence et le degré d'importance qu'ils prennent en fonction de sa localisation.

1.3.3.1 À l'intérieur des bâtiments

L'ensemble des différents facteurs climatiques du territoire, et notamment la température de l'air et la vitesse du vent, peuvent être utilisés pour équilibrer les conditions microclimatiques des locaux, en favorisant sa climatisation naturelle. La disposition de la construction face à l'incidence des courants d'air va générer différentes zones de pressions, mais indépendamment des résultats de cette relation nous trouverons toujours des zones en surpression et d'autres en dépression (GANDEMER, 1992). Elles sont indiquées sur les façades comme (+) pour les surpressions et (–) pour les dépressions, tel que GANDEMER (1992) le présente dans la Figure 1.10.

Les entrées et sorties d'air doivent être disposées de telle sorte qu'elles permettent de mettre en relation les différentes pressions pour renouveler et extraire l'air pollué de façon efficace (GANDEMER, 1992 ; LAMBERTS et al., 2014).

Les choix architecturaux en fonction du vent peuvent donc donner des idées ou des principes au moment de la conception pour l'emplacement du projet, les orientations de ses volumes et ses façades, sa perméabilité et la morphologie de ses différents éléments.

1.3.3.2 Dans l'espace public

L'espace public doit être pensé, discuté et dessiné par groupes interdisciplinaires d'architectes, urbanistes, sociologues entre autres (CHIAPPERO, 2002). Ce processus a parmi ses finalités l'identification des besoins des habitants et la proposition d'espaces agréables qui répondent à ces besoins en permettant le développement de leurs activités.

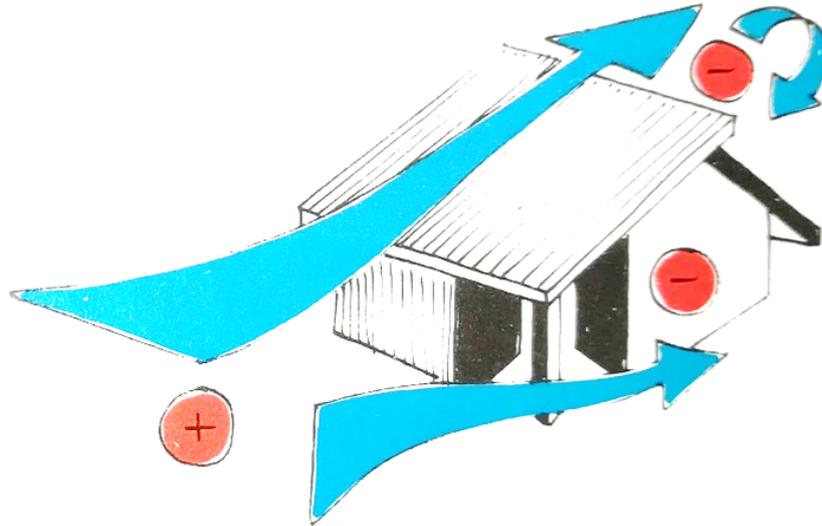


FIGURE 1.10 – Dispositions de pressions sur une maison (GANDEMER, 1992).

Cela inclut les aspects formels, esthétiques et matériels des espaces qui doivent répondre à un ensemble de facteurs plus importants incluant les aspects sociaux, culturels, historiques et environnementaux du lieu (THOMAS et al., 2010). Nous nous focalisons sur ces derniers aspects et plus spécifiquement sur les phénomènes aérodynamiques et les éléments qui ont des relations directes avec ces phénomènes.

Pour analyser le comportement aérodynamique il faut prendre en compte l'ensemble construit qui peut s'opposer ou a contrario guider l'écoulement du vent dans les espaces publics, où peuvent se trouver des convergences de différentes pressions (GANDEMER, 1994). C'est pourquoi au moment de faire un modèle numérique ou physique pour simuler le comportement du vent, on ne se concentre pas seulement sur les champs de vitesses et de pressions sur une construction isolée, mais sur ceux produits sur l'ensemble d'un quartier ou d'un fragment urbain (PÉNEAU, 1996). L'application des études sur ces modèles au niveau des effets produits à l'échelle des piétons sont abordées principalement à travers quatre enjeux : l'écoulement du vent autour des constructions à la hauteur des piétons, l'effet de la pluie poussée par le vent sur les bâtiments (*WDR Wind-Driven Rain*), les échanges énergétiques des surfaces par la convection, et enfin la dispersion des polluants (BLOCKEN et al., 2009).

Les effets mécaniques du vent sont plus importants dans les espaces extérieurs que dans les espaces intérieurs. Ils peuvent définir le niveau du confort des usagers, voire générer des situations de danger (BLOCKEN et al., 2009). Les vitesses changeantes du vent dans un espace obligent les piétons (qui eux-mêmes sont un obstacle au phénomène)

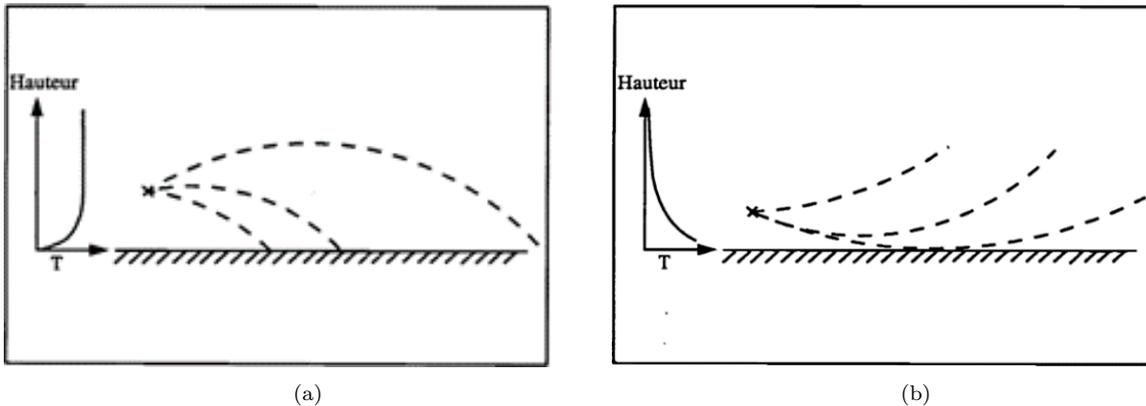


FIGURE 1.11 – Rayons acoustiques en présence de gradients de température (a) positif (b) négatif (CHEVRET, 1994).

à une adaptation constante, ce qui rend encore plus complexe l'analyse de ces phénomènes (GANDEMER, 1994).

Le confort thermique des usagers, d'un point de vue microclimatique, est lié principalement à la température, l'humidité, au rayonnement et au vent (SACRÉ et GANDEMER, 1993) (cf. section 1.2). Dans l'espace public les usagers se trouvent dans des situations moins contrôlées qu'à l'intérieur des bâtiments et ils sont beaucoup plus exposés aux phénomènes environnementaux. Les gains énergétiques résultent principalement du rayonnement solaire direct, tandis que les pertes sont dues principalement à la convection (vent) (SACRÉ et GANDEMER, 1993).

De plus, la direction du vent joue un rôle aussi sur la propagation des ondes sonores. Lorsqu'il n'y a pas d'influence de la température, et que la direction des ondes sonores est la même que celle du vent (profil de vitesse positif, qui ressemble au gradient de température positif présenté dans la Figure 1.11a) l'énergie sonore est dirigée vers le sol, tandis que quand les ondes sonores se déplacent dans une direction opposée à la direction du vent, les ondes sont orientées vers le ciel (voir la Figure 1.11b) (CHEVRET, 1994). Cela génère dans le premier cas des effets sonores focalisés vers les usagers de l'espace public tandis que dans le deuxième cas il existe une zone d'ombre au niveau du sol qui les protège de cette incidence.

En conclusion de cette partie, les effets du vent dans les espaces urbains peuvent être amplifiés et peuvent être le résultat de différents facteurs à diverses échelles. Le fait qu'ils soient des espaces ouverts non contrôlés fait d'eux des endroits où leurs composantes morphologiques et environnementales affectent fortement les expériences vécues des pié-

tons. Dans ces espaces les effets mécaniques du vent deviennent plus remarquables pour les raisons précédemment évoquées et de même ses effets convectifs affectent la situation thermique. La qualité de l'air de ces espaces ne dépend pas uniquement des activités qui y sont développées mais de tout leur environnement, de la dispersion ou de la canalisation des polluants et des champs de pression générés tout autour du cadre bâti.

Dans ce chapitre nous avons présenté les enjeux du vent ainsi que l'intérêt à le représenter. Cela a soulevé certaines questions relatives au public visé et au type d'espace à analyser.

Nous nous sommes dans un premier temps posé la question d'étudier les effets du vent dans l'espace intérieur ou dans l'espace extérieur. Ces deux options ont des enjeux communs, néanmoins quelques-uns sont beaucoup plus remarquables, ou moins contrôlables, dans les espaces extérieurs. C'est pourquoi nous avons choisi de nous intéresser aux environnements extérieurs, où les usagers ont moins la faculté d'agir face aux phénomènes physiques.

Maintenant que nous avons présenté l'intérêt de représenter le vent, et nous avons expliqué pourquoi nous nous intéressons aux espaces extérieurs, nous présentons les diverses représentations du vent dans les deux chapitres suivants.

VISUALISATIONS ET REPRÉSENTATIONS COURANTES DU VENT

Sommaire

2.1	Introduction	41
2.2	Représentations visuelles et audiovisuelles de la présence du vent	41
2.2.1	Photographie / peinture	41
2.2.2	Synthèse d'images	42
2.2.3	Cinéma	47
2.2.4	Suggestion de la matérialisation du flux du vent	48
2.3	Visualisations du vent en architecture et ingénierie	51
2.3.1	Suggestions visuelles des propriétés du vent	51
2.3.2	Visualisations scientifiques du flux du vent sur des modèles physiques	56
2.3.3	Visualisations scientifiques (numériques) du flux du vent	57
2.3.3.1	Visualisations traditionnelles	59
2.3.3.2	Visualisation illustrative	62
2.3.4	Animations basées sur les représentations scientifiques	65

2.1 Introduction

Les effets du vent peuvent être perçus par différents sens, de façon directe par le toucher et l'audition, et de façon indirecte par la vision, car nous voyons ses effets mécaniques sur les éléments du contexte. C'est pourquoi notre recherche bibliographique ne se limite pas aux effets directs du vent.

Dans ce chapitre, nous présentons deux des trois principaux groupes de représentations du vent que nous avons trouvés dans la littérature, qui constituent la base de notre prototype expérimental. Nous présentons d'abord les représentations du vent de façon visuelle (dans la photographie, la peinture et la synthèse d'images) et audiovisuelle (dans le cinéma), où ce phénomène est représenté notamment par ses effets mécaniques sur les éléments du contexte. Ensuite, nous nous concentrons sur la visualisation de l'écoulement du vent dans les champs de l'architecture et l'ingénierie.

Le troisième groupe de représentations étudiées concerne les restitutions tactiles du vent, explorées dans le domaine de la réalité virtuelle. Ce groupe sera présenté dans le chapitre 3.

2.2 Représentations visuelles et audiovisuelles de la présence du vent

Nous trouvons différents exemples des représentations suggestives de la présence du vent dans les expressions artistiques. Ces exemples illustrent les effets mécaniques résultants de l'incidence du vent sur les objets, l'environnement et les personnes qui sont soumises à son influence. Elles sont détaillées ci-dessous.

2.2.1 Photographie / peinture

Dans les images statiques, la nature dynamique du vent peut être reproduite par un effet de flou de l'image. Il donne une notion du déplacement telle que dans la Figure 2.1, où BLOCKEN et al. (2009) exposent une photographie où l'orientation du vent est exprimée par le mouvement des feuilles dans l'air, des vêtements du piéton et la déformation du parapluie. Tant les feuilles que la personne et son parapluie sont flous et contrastent avec la netteté des objets statiques. Au moment où les éléments flous sont superposés aux éléments statiques, ces derniers deviennent moins nets. Ceci apparaît clairement dans



FIGURE 2.1 – Visualisation du vent par un effet de flou, incidence sur les piétons (a) photographie (BLOCKEN et al., 2009) ; (b) peinture (BARR, 2016).

l'exemple de la Figure 2.1b, où BARR (2016) peint une vue immersive d'une journée pluvieuse le long d'une rue. Il invite les observateurs à partager les sentiments provoqués par les conditions climatiques. Nous retrouvons les traces floues qui « dématérialisent » le bord du bâtiment et communiquent la direction de déplacement du vent.

2.2.2 Synthèse d'images

Ces questions sont aussi abordées du côté des animations graphiques faites à l'aide des ordinateurs. Ici les propriétés dynamiques des environnements sont utilisées pour exprimer les propriétés du vent et ses effets sur le contexte et les éléments qui le composent.

Un exemple de ce type de représentations est utilisé par WANG et al. (2006) qui présentent une scène photo-réaliste en 3D qui prend en compte les caractéristiques physiques et les incidences du vent sur la neige. L'orientation de la chute de la neige suggère la direction et la vitesse du vent (voir la Figure 2.2).

DOBASHI et al. (2000) proposent une méthode pour la formation, l'animation, la dispersion et le déplacement réaliste des nuages dans un contexte numérique. Le déplacement est donné comme une suggestion de l'orientation et de la vitesse dominante du vent dans l'axe horizontal, laquelle est variable en fonction de la hauteur de propagation (voir la Figure 2.3).

MAX et al. (1992) s'intéressent aussi aux conséquences du vent sur les nuages des

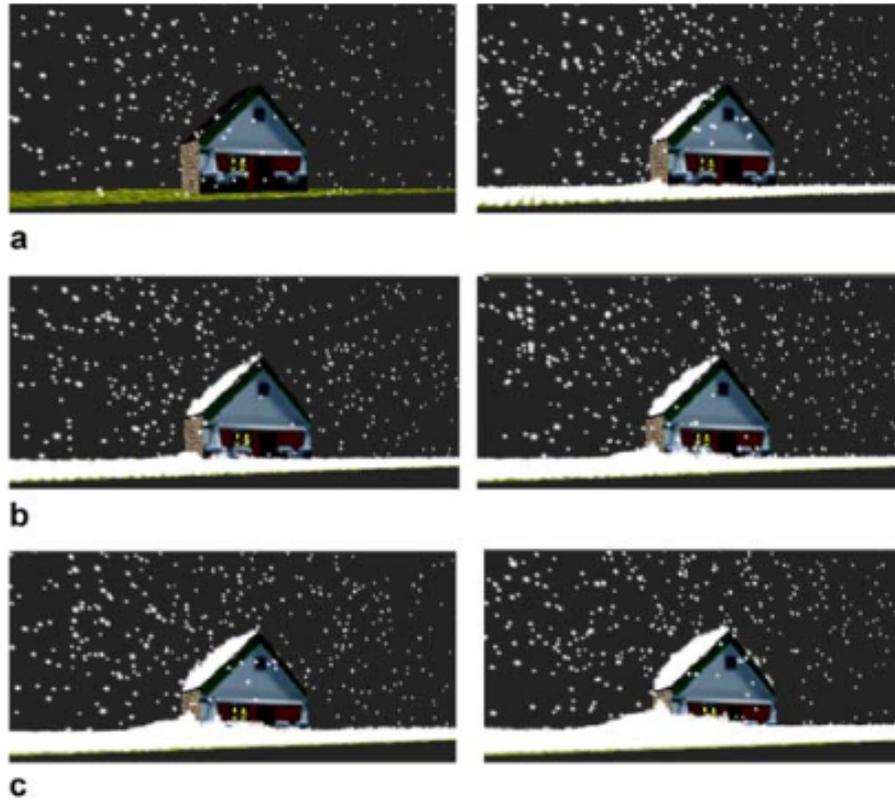


FIGURE 2.2 – Influence et direction du vent sur la neige (WANG et al., 2006).



FIGURE 2.3 – Dispersion et déplacement de nuages (DOBASHI et al., 2000).



FIGURE 2.4 – Déplacement des nuages pour indiquer l’influence et la direction du vent (VIGIER, 2015).

scènes numériques. Pour rendre visibles ses effets ils appliquent une texture volumétrique et dynamique au modèle qui se déplace en fonction de l’orientation du vent. Sa finalité est de présenter au public une visualisation réaliste de l’influence des vitesses du vent.

Dans la même idée, VIGIER (2015) communique la présence et la vitesse du vent dans une restitution immersive de réalité virtuelle à partir du déplacement des nuages (voir la Figure 2.4). Elle exagère la vitesse de leurs déplacements par rapport à celle de la réalité afin que la suggestion de la présence du vent soit bien perçue par les utilisateurs du dispositif. Ceci, d’après les retours des spectateurs/utilisateurs, ne compromet pas le réalisme de la scène.

BAKAY et HEIDRICH (2002) proposent un rendu réaliste de la pelouse affectée par l’incidence du vent sur une scène numérique. Cette incidence est présentée dans le modèle comme une force perpendiculaire à la normale (les vecteurs verticaux) de la pelouse. La fréquence d’incidence du vent peut être constante ou périodique en fonction des besoins (voir la Figure 2.5).

Dans la même idée d’animer les éléments végétaux du contexte, DIENER et al. (2009) exposent une méthode d’animation et de déformation dynamique des arbres en temps réel, afin de donner du réalisme aux éléments végétaux dans les environnements virtuels. Dans cette méthode, l’influence du vent est considérée comme une force qui se distribue uniformément tout au long de l’objet tridimensionnel, ce qui peut réduire la précision de l’animation, pourtant en gardant son réalisme (voir la Figure 2.6).

QUIGLEY et al. (2018) proposent une méthode pour animer la dynamique des arbres et ses différents composantes (tronc, branches, rames, feuilles, fruits) dans des environnements virtuels, en fonction des facteurs extérieurs qui les affectent et particulièrement

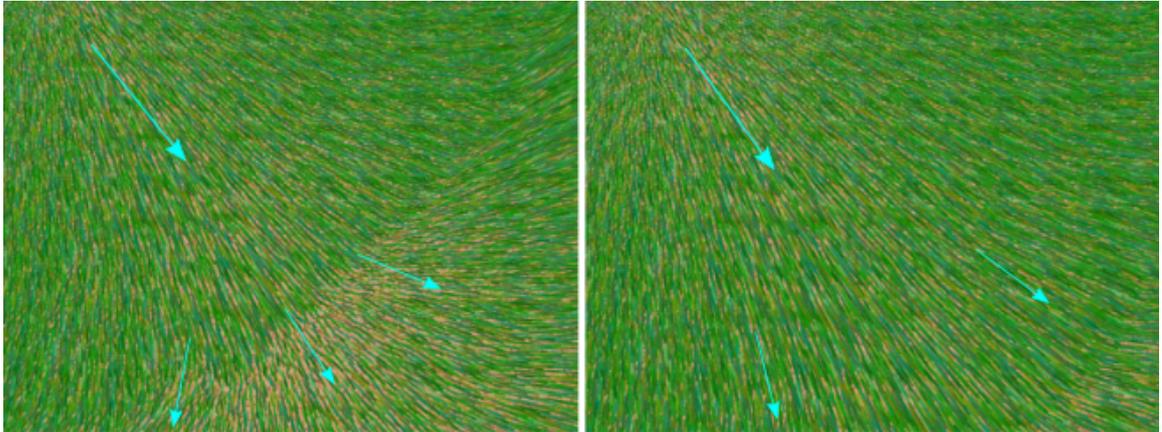


FIGURE 2.5 – Animation de la pelouse en fonction de l’incidence du vent (BAKAY et HEIDRICH, 2002). Les lignes bleues représentent la direction indicative du flux du vent.

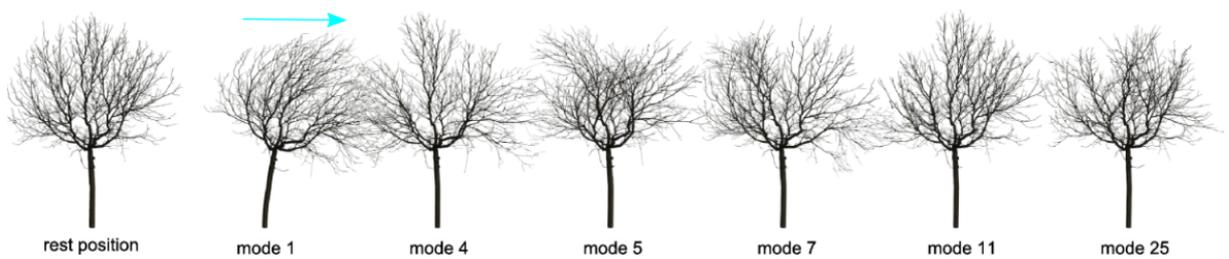


FIGURE 2.6 – Des exemples de la déformation d’un arbre en fonction de l’incidence du vent (DIENER et al., 2009). La ligne bleue représente la direction indicative du flux du vent.



FIGURE 2.7 – Incidence du vent sur un arbre (QUIGLEY et al., 2018).



FIGURE 2.8 – Des effets du vent sur des bulles de savon (WEI et al., 2003).

le vent. La pression du vent exercée sur l'ensemble des éléments et ses particularités génère des déformations (voir la Figure 2.7) semblables à celles qui sont observables dans la réalité.

WEI et al. (2003) présentent une méthode alternative pour représenter les effets du vent. Ils utilisent les simulations du comportement du vent pour modifier la trajectoire et l'aspect des bulles de savon dans la scène, lesquelles se déforment et se déplacent en fonction de l'incidence horizontale du vent et l'effet vertical de la gravité (voir la Figure 2.8). Avec le même modèle ils représentent le comportement des plumes affectées par l'incidence du vent.

STAM et al. (2001) proposent une méthode pour représenter l'évolution et la dispersion de la fumée avec ses comportements turbulents. Son comportement est défini par sa

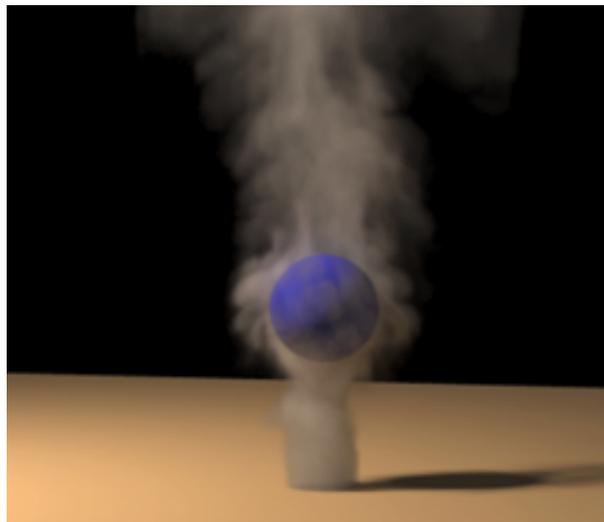


FIGURE 2.9 – Évolution de la fumée autour d’une sphère (STAM et al., 2001).

température, sa densité, et les forces externes, telles que ses interactions avec les objets présents (voir la Figure 2.9).

2.2.3 Cinéma

Nous retrouvons ces propositions de représentations dans le cinéma, où le vent est suggéré par son influence sur les environnements et les objets. Un exemple se trouve dans le film « Phénomènes » (SHYAMALAN, 2008) où la présence du vent est évidente tout au long du développement de l’histoire. Elle est représentée, comme c’est le cas dans la Figure 2.10, d’une façon visuelle par les effets mécaniques résultant de la pression du vent sur les arbres, la pelouse, les vêtements et les cheveux des protagonistes. Pourtant, la présence du vent n’est pas exprimée uniquement de façon visuelle. Les effets sonores résultant de son souffle jouent un rôle aussi important dans la scène que les effets visuels.

Dans les courts-métrages « Le parapluie bleu » (UNSELD, 2013) et « Les avions de papier » (KAHRS, 2012) nous trouvons le vent comme fil conducteur. Tout au long des deux histoires, il devient acteur et protagoniste. Dans le premier exemple (voir la Figure 2.11), la première apparition du vent arrive comme résultat du déplacement d’air dû à la vitesse d’une automobile. Ensuite le vent devient beaucoup plus agressif à cause des conditions climatiques, en se manifestant à travers les drapeaux, la pluie et finalement le parapluie, qui est séparé de son porteur. Nous pouvons entendre le vent, voir sa direction et comprendre sa force à partir de ces éléments.



FIGURE 2.10 – Incidence du vent, film « Phénomènes » (SHYAMALAN, 2008).



FIGURE 2.11 – Court-métrage « Le parapluie bleu » (UNSELD, 2013).

Dans le deuxième exemple (voir la Figure 2.12), de la même façon que dans le précédent, les premières impressions du vent sont données comme conséquence du déplacement d'un véhicule, et dans ce cas celui d'un train qui arrive à grande vitesse. Il affecte les cheveux, les vêtements et, principalement les feuilles de papier que transportent les protagonistes. Ensuite nous le retrouvons comme un courant d'air qui entre par la fenêtre dans l'espace de travail et apporte avec lui une feuille de papier.

2.2.4 Suggestion de la matérialisation du flux du vent

Dans certains cas, la matérialisation du comportement du vent est ajoutée au résultat de ses effets mécaniques. Par exemple, dans la peinture de Botticelli, La naissance de Vénus (voir la Figure 2.13), nous voyons Zéphyr qui personnifie les vents provenant de l'ouest, portant Chloris et soufflant vers Vénus. Le vent soufflé par Zéphyr est représenté



FIGURE 2.12 – Court-métrage les « Les avions de papier » (KAHRS, 2012).

par des traces fines et blanches, qui sont concentrées à son origine et se dispersent au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de sa source. De Chloris émane aussi un peu de vent, mais dans ce cas il se disperse dans un espace beaucoup plus proche d'elle, exprimant les différentes intensités et vitesses du vent. Zéphyr et Chloris sont entourés par des fleurs, qui apparemment les accompagnent dans leur déplacement, comme le vent qui amène des pétales avec lui. La direction de leur déplacement est indiquée par le mouvement de leurs cheveux et de leurs vêtements.

Ces éléments se retrouvent dans les dessins animés comme c'est le cas du film animé de Pocahontas (GABRIEL et GOLDBERG, 1995) ou Les trois petits cochons (GILLET, 1933). Dans le premier (voir la Figure 2.14a) nous voyons que les traces du passage du vent qui enveloppent les protagonistes sont dessinées avec une tonalité rose, translucide et floue. Le vent agit sur les vêtements, les cheveux et même les mouvements. Il amène des feuilles sèches avec lui qui suivent sa trajectoire. Dans le deuxième exemple, nous voyons le souffle du loup qui déplace les éléments de la hutte jusqu'à la détruire. Le vent est désigné par des lignes qui forment des rafales progressives qui se dispersent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de sa source. Elles sont aussi accompagnées de lignes droites qui expriment la vitesse du vent (voir la Figure 2.14b). Dans ces représentations audiovisuelles, la composante sonore du vent est également fortement présente.

En conclusion de cette partie, retenons que la présence du vent peut être suggérée sur une représentation et stimuler les sens des personnes sans utiliser de stimulation tactile. Les effets tant visuels que sonores ont le pouvoir d'exprimer la présence du vent, ainsi que de donner une idée de sa direction et de son intensité. Ces propriétés sont décrites dans le Tableau 2.1.



FIGURE 2.13 – La naissance de Vénus (extrait) (BOTTICELLI, 1485).

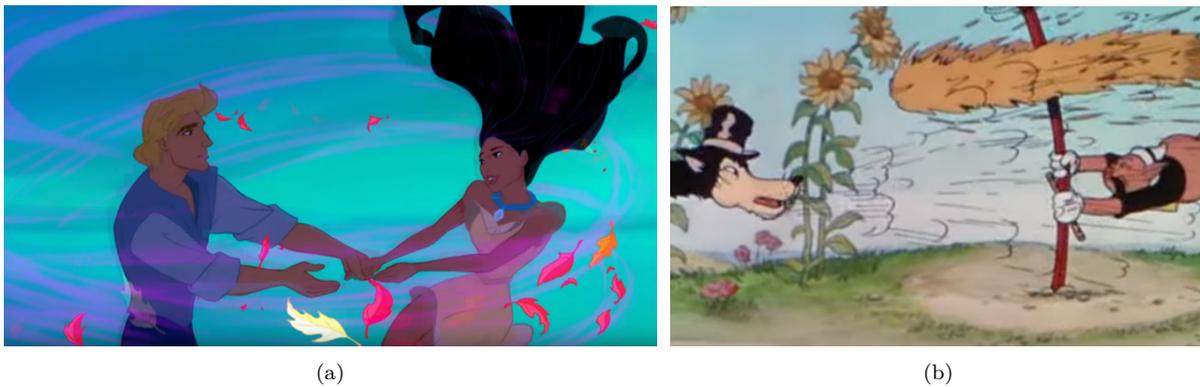


FIGURE 2.14 – (a) The colors of the wind, film Pocahontas (GABRIEL et GOLDBERG, 1995). (b) Film les Trois Petits Cochons (GILLETT, 1933).

TABLE 2.1 – Synthèse des rendus suggestifs des effets mécaniques du vent.

Rendus visuels des effets mécaniques sur le contexte et les objets	Effets mécaniques à cause de la présence du vent, exprimés sur les vêtements, les cheveux, les éléments végétaux, les textiles, etc.
Effets sonores	Souffles du vent qui accompagnent les effets visuels des scènes dynamiques, ils expriment la présence et l'intensité du vent.

2.3 Visualisations du vent en architecture et ingénierie

L'œil est notre principal capteur d'information, c'est par la vision que nous percevons et interprétons principalement des informations telles que les formes, les couleurs, les distances et les dynamiques d'un espace (HALL, 1969). Dans les domaines de l'architecture et l'urbanisme, les professionnels utilisent différentes méthodes et techniques de représentations visuelles afin de matérialiser et communiquer leurs projets. La représentation de la ville et de l'architecture est donc principalement visuelle (DROZD, 2011). C'est pourquoi au moment de représenter un phénomène physique qui déplace un ensemble de gaz invisibles il devient nécessaire, dans les domaines de l'architecture et de l'urbanisme, d'utiliser des effets visuels afin de le comprendre, de l'analyser et finalement de communiquer sa présence.

Mais, comment représenter visuellement ce qu'on perçoit mais qu'on ne voit pas ? Cette question peut être abordée par deux chemins différents. La première solution est de suggérer la présence du vent, tel que nous le percevons visuellement dans la réalité, par ses effets mécaniques sur les éléments qui cèdent à sa force (présentés dans la section 2.2). La deuxième solution passe par la matérialisation du flux de vent basée sur des données, objectives ou indicatives, pour le rendre visible. Nous trouvons des éléments partagés et des particularités qui caractérisent chacune de ces représentations.

2.3.1 Suggestions visuelles des propriétés du vent

Nous présentons dans cette sous-section la visualisation de l'écoulement du vent utilisée pour comprendre et expliquer le comportement du vent et son interaction avec l'environnement. Ces suggestions sont basées sur le principe physique de déplacement du vent, ainsi que des pressions résultantes.

Un exemple de ces suggestions de la présence du vent se trouve dans les représentations des projets d'architecture bioclimatique où, comme nous l'avons évoqué précédemment, la visualisation du vent peut avoir lieu à différentes étapes du projet. Les circulations d'air sont généralement représentées par des flèches qui traduisent leurs directions et avec différentes colorations qui expriment les différences de température de l'air, comme c'est le cas de la Figure 2.15.

Traditionnellement les projections orthographiques sont un support technique partagé

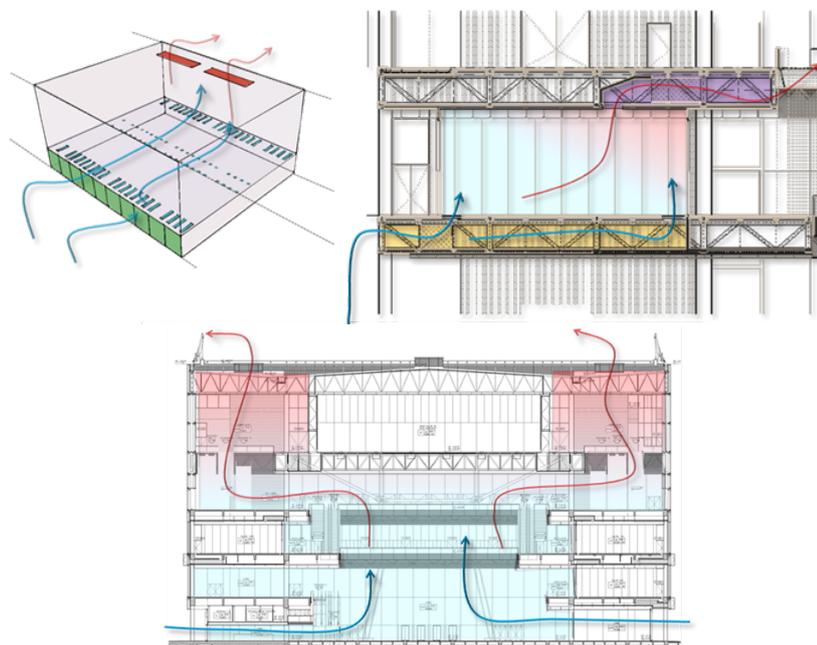


FIGURE 2.15 – Exemple de schémas de ventilation. Projet « AGORA Bogotá : Centro de Convenciones ». Élaborés par l’auteur au bureau d’études « Arquitectura & Bioclimática, Colombie ».

parmi les professionnels intervenants dans un projet architectural. Elles sont composées de vues bidimensionnelles de plans, élévations et coupes, dont la lecture conjointe donne une idée tridimensionnelle de la composition (FARRELLY, 2009). Ces représentations permettent de comprendre et de mettre en évidence les relations entre les espaces intérieurs et extérieurs et la cohérence de l’ensemble des éléments qui composent le projet. Elles sont caractérisées par des aspects techniques tels que des annotations, les types de matériaux, les épaisseurs des surfaces, l’orientation et l’échelle, qui permettent de parcourir le projet à différents niveaux.

Néanmoins, ces représentations peuvent être difficiles à comprendre par les non-initiés, particulièrement la compréhension tridimensionnelle du projet en partant de visualisations bidimensionnelles. C’est pourquoi l’utilisation de la perspective facilite la compréhension volumétrique, les activités des personnes incluses dans la représentation et les interactions environnementales. Bien qu’elles puissent transmettre une sensation de réalisme, elles sont sujettes à la manipulation artistique de l’architecte afin de communiquer et mettre en valeur une idée particulière. FARRELLY souligne que « *Bien que les images en perspective offrent habituellement l’impression d’un espace réel, elles peuvent faire apparaître comme*

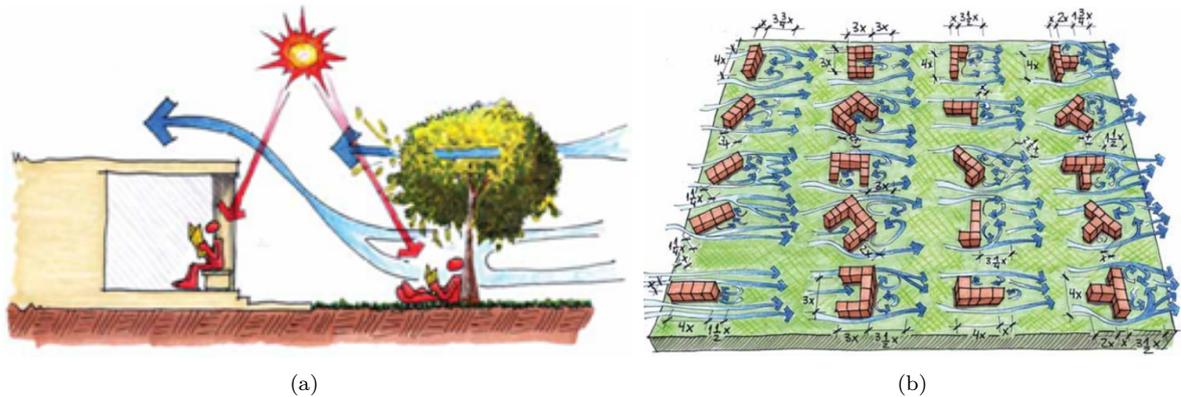


FIGURE 2.16 – Représentation de l’incidence des phénomènes physiques sur les bâtiments, (a) vent et soleil en coupe et (b) incidence du vent en perspective (LAMBERTS et al., 2014).



FIGURE 2.17 – Principe de la ventilation croisée (LAMBERTS et al., 2014).

possible quelque chose qui semble impossible » (FARRELLY, 2009, p.96).

Il est donc naturel de trouver les représentations des phénomènes physiques sur ce type de représentations pour analyser, comprendre et communiquer leurs incidences et interactions sur les projets architecturaux et urbains (voir la Figure 2.16).

LAMBERTS et al. (2014) présentent un livre dont l’objectif principal est de donner les principes microclimatiques pour introduire ces concepts dans la conception des projets architecturaux en relation avec la performance énergétique, en ciblant le confort des usagers. Ils optent pour une représentation faite à la main, à la manière d’une bande dessinée afin de guider et introduire le lecteur d’une façon intuitive et claire à ces notions (voir la Figure 2.17).

De même, GANDEMER (1992) présente le guide de la climatisation naturelle avec des schémas qui illustrent les principes et notions clés à utiliser pour s’adapter aux conditions

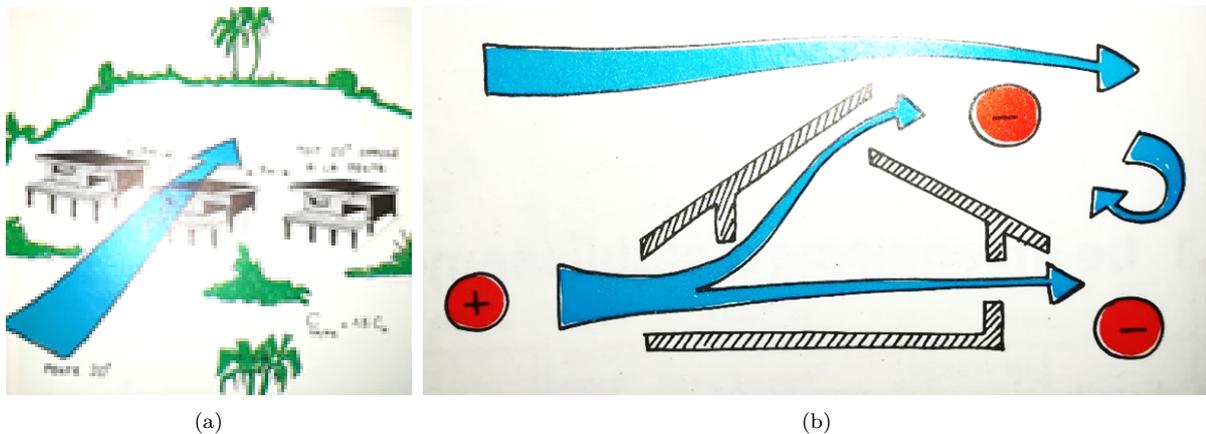


FIGURE 2.18 – Principes de conception pour profiter des effets du vent (GANDEMER, 1992).

microclimatiques et atteindre des conditions de confort dans un climat tropical humide. Bien qu'ils soient exprimés d'une manière qualitative par le dessin à main levée, ils sont basés sur des données et expériences quantitatives (voir la Figure 2.18).

Concernant les représentations urbaines, elles sont faites principalement d'un point de vue global qui permet d'identifier les différents éléments du territoire pour définir les principes d'intervention. La loi paysage de 1993 renforce la nécessité de dessiner les éléments structurants du paysage qui jouent un rôle dans le déroulement du projet (CHIAPPERO, 2002). Néanmoins, pour communiquer et clarifier les idées exprimées dans un plan à une échelle urbaine, il devient nécessaire d'utiliser d'autres moyens de représentation à des échelles plus proches des perceptions observables par le piéton. Une option (analytique) se trouve dans l'utilisation de coupes bidimensionnelles qui expriment d'une part les morphologies, les dimensions et les matérialités. D'autre part, les coupes peuvent exprimer des éléments qui transmettent des ressentis relatifs aux ambiances projetées, tels que la présence d'individus qui développent des activités et auxquelles il est possible de s'identifier, des zones calmes accompagnées de végétation ou d'autres plus bruyantes le long des rues, les ombres produites par les arbres ou des endroits exposés ou protégés du vent (CHIAPPERO, 2002). Un exemple d'une expression des ambiances d'un lieu exprimés dans une coupe urbaine est présenté par TIXIER (2016) (voir la Figure 2.19).

Une autre façon d'exprimer ces idées passe par l'utilisation des perspectives qui suggèrent la tridimensionnalité du projet à partir d'images bidimensionnelles. Bien qu'elles puissent être illustrées d'un point de vue allocentré, à partir d'une captation aérienne, afin de communiquer une vue générale du projet, elles sont plus souvent représentées depuis

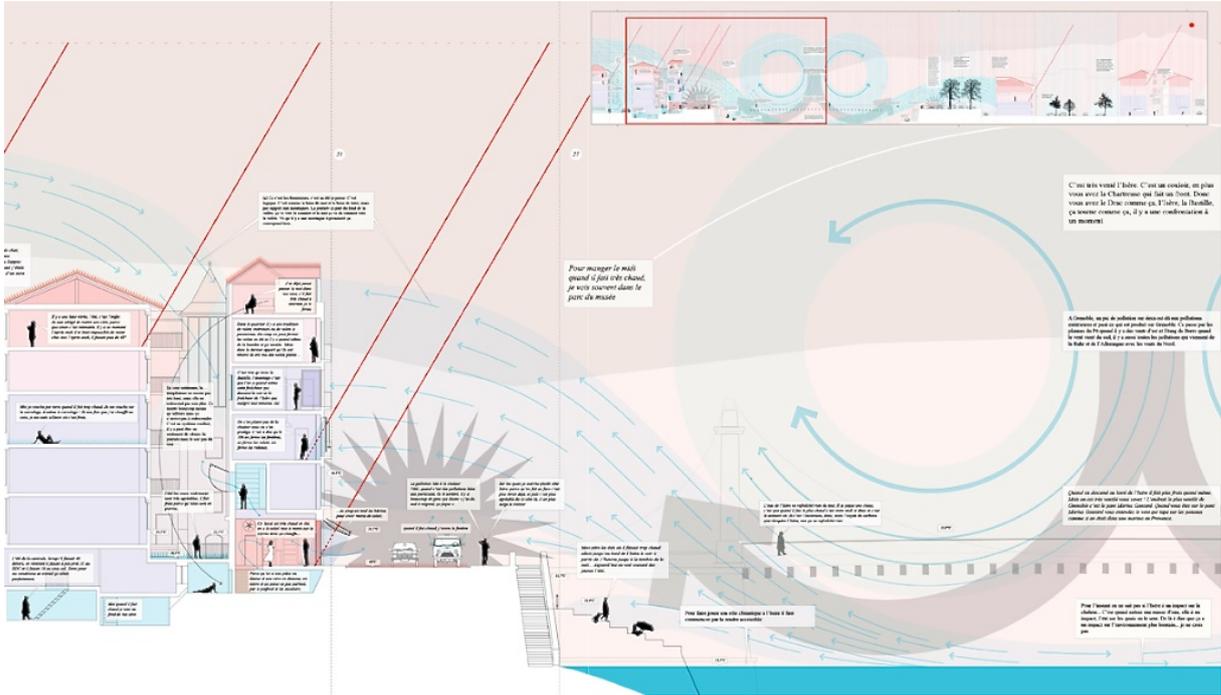


FIGURE 2.19 – Représentation des ambiances d’un lieu dans une coupe (TIXIER, 2016).

un point de vue qui correspond à la hauteur des yeux humains (représentation egocentrée) (FARRELLY, 2009). Ce point de vue permet aux observateurs de regarder la scène comme elle pourrait être vue et vécue dans la réalité. Il permet donc d’être un participant passif du contexte représenté.

Ces représentations présentent un potentiel d’utilisation pour représenter le phénomène du vent d’un point de vue immersif afin de communiquer sur les effets produits par et sur les formes urbaines, tels que des accélérations ou les effets de canalisations, entre autres. Cela a des implications sur la relation des piétons avec l’espace, son utilisation et sa fréquentation. Un exemple est présenté par BUSTAMANTE et al. (2014) dans la Figure 2.20. Le dessin ne nous montre pas uniquement les effets produits à la hauteur de l’observateur mais aussi ceux qu’il peut observer, ou non, à des hauteurs supérieures.

Les visualisations présentées dans cette sous-section mettent en évidence la présence du vent, et donnent une idée qualitative de son comportement. Elles sont présentées à titre indicatif afin d’expliquer son fonctionnement. Dans les deux sous-sections suivantes nous présentons les visualisations de l’écoulement du vent résultant de son comportement sur un modèle physique ou d’un processus de calcul.

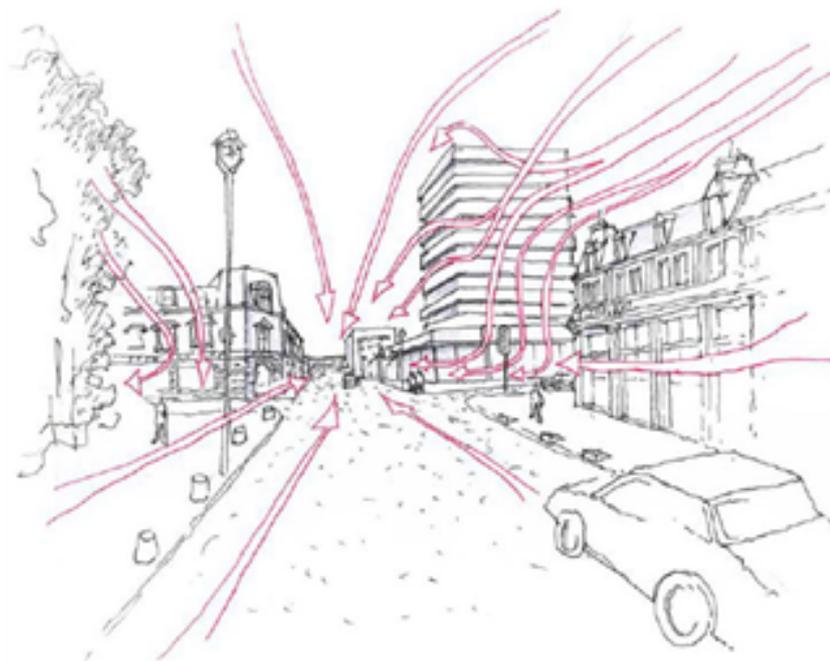


FIGURE 2.20 – Schéma indicatif des tourbillons dans l'espace urbain (BUSTAMANTE et al., 2014).

2.3.2 Visualisations scientifiques du flux du vent sur des modèles physiques

La visualisation des écoulements d'air est utilisée pour le développement de voitures, d'avions, de vaisseaux spatiaux (RISTIC, 2007), de constructions, de bâtiments (Figure 2.21), entre autres. Elle permet d'avoir une idée générale du comportement du fluide sur les objets même avant de lancer les calculs (RISTIC, 2007). Ce processus permet de rendre visibles, et de mettre en évidence, les comportements ou les problèmes qui seraient normalement invisibles. D'après RISTIC (2007) les visualisations de fluides peuvent être divisées entre (I) les visualisations de l'écoulement en surface (qui impliquent l'utilisation d'encre fluorescente, d'huiles, etc. appliquées sur la surface du modèle) et (II) les visualisations de l'écoulement hors surface qui utilisent de la fumée, de l'huile et des bulles de savon remplies d'hélium. Ces méthodes sont dépendantes d'un système d'éclairage approprié ainsi que d'un dispositif d'enregistrement de l'image (RISTIC, 2007).

L'utilisation de la fumée est une technique efficace pour rendre visible l'écoulement du vent. La Figure 2.22 montre les lignes résultant de l'injection de fumée sur un objet. L'un des facteurs qui a permis l'avancement de la visualisation par la fumée est l'introduction



FIGURE 2.21 – Visualisations du comportement aérouliqu par injection de fumée (FAURE et FLAMAND, 2009).

de l'éclairage par l'utilisation de lasers (RISTIC, 2007) (voir la Figure 2.23).

Dans un liquide un équivalent à l'injection de fumée peut se faire à l'aide de colorants. Un exemple est présenté dans la Figure 2.24.

D'après RISTIC (2007), les visualisations numériques de fluides montrent un intérêt pour la facilité à analyser rapidement tant les aspects qualitatifs que quantitatifs du comportement du vent. De plus la qualité du rendu, en termes d'éclairage et d'enregistrement d'image, présente un avantage pour comprendre le résultat. C'est sur ce type de visualisations que nous nous concentrons dans la sous-section suivante.

2.3.3 Visualisations scientifiques (numériques) du flux du vent

L'autre type de représentation du vent trouvée dans les projets provient de la visualisation de résultats des simulations CFD. Ces visualisations, qui peuvent être statiques ou dynamiques, donnent un résultat approximatif du comportement du vent selon les différentes variables morphologiques et atmosphériques du contexte numérisé. Elles servent tant pour comprendre et quantifier un comportement présent dans un lieu existant que pour valider les choix faits pour les projets ou les modifications à venir.

Dans cette sous-section nous présentons diverses méthodes de visualisation de la dynamique des fluides qui ne sont pas uniquement utilisées pour le vent. C'est pourquoi nous nous référons aux fluides au lieu que uniquement au vent ici. Les visualisations réalisées par ordinateur constituent un support visuel des processus de calcul mathématiques qui ont pour finalité de prévoir les comportements d'un fluide selon ses caractéristiques et celles de son environnement, ou d'analyser et de comprendre un comportement existant.

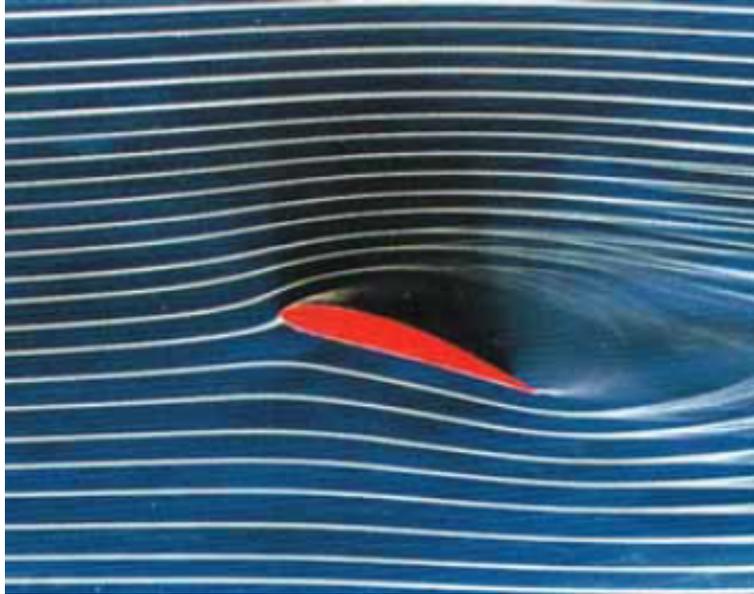


FIGURE 2.22 – Visualisation dans le tunnel de fumée de l’Onera (RISTIC, 2007).

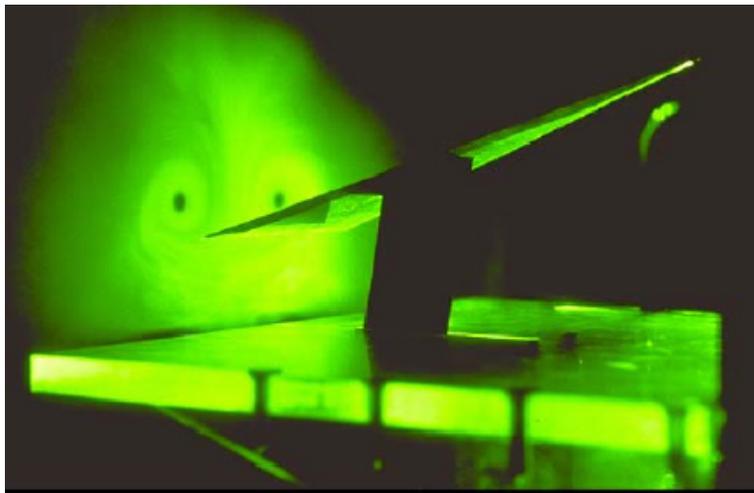


FIGURE 2.23 – Visualisation de l’écoulement tourbillonnaire par l’utilisation de fumée et de lasers. (RISTIC, 2007).

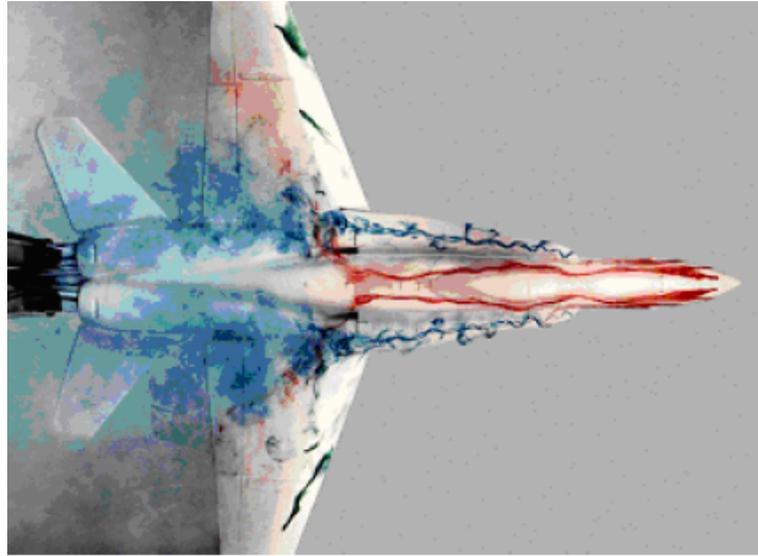


FIGURE 2.24 – Visualisation de l'écoulement du vent à l'aide de liquides et colorants (RISTIC, 2007).

Elles sont basées sur des données résultant de mesures *in situ*, ou des simulations sur des modèles physiques ou numériques.

2.3.3.1 Visualisations traditionnelles

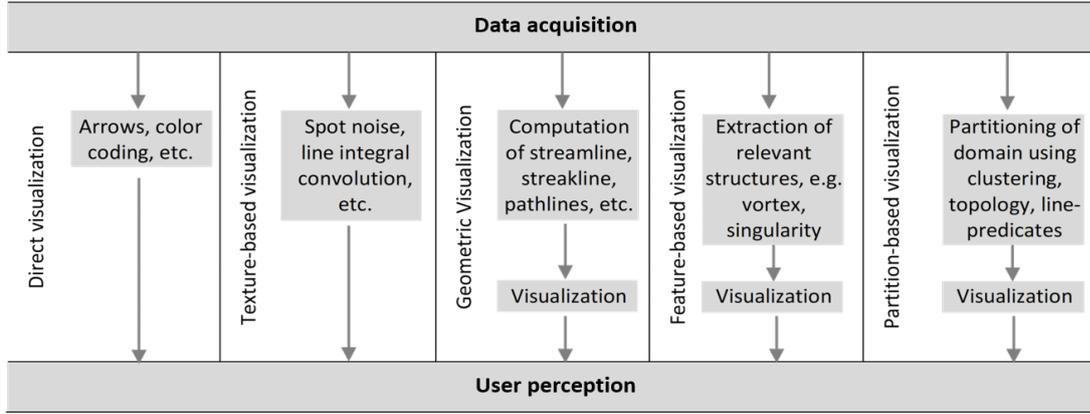
Ce premier groupe de méthodes comprend les diverses façons d'afficher des informations numériques qui ont été catégorisées par POST et al. (2004) en quatre composantes (*direct visualization* – *texture-based visualization* – *geometric visualization* – *feature-based visualization*) selon le traitement appliqué sur les données. Basés sur cette catégorisation, SALZBRUNN, JANICKE et al. (2008) ajoutent une cinquième composante : *la partition-based visualization* (voir le Tableau 2.2).

SALZBRUNN, JANICKE et al. (2008) nous présentent cette classification en cinq composants, qu'ils sous divisent en deux groupes. Le premier comprend les trois premières composantes qui se focalisent sur la visualisation des valeurs des données brutes des champs de vecteurs. Le deuxième groupe comprend les deux composantes restantes basées sur l'abstraction et l'assemblage des données.

Premier groupe de visualisations :

Direct visualization, est un rendu qui communique de la façon la plus directe possible les données brutes des écoulements résultant des simulations ou mesures, telles que la

TABLE 2.2 – Classification des techniques de visualisation de fluides (SALZBRUNN, JANICKE et al., 2008).



pression, la direction ou la vitesse (LARAMEE et al., 2004). Elles sont normalement exprimées par des colorations (voir la Figure 2.25a) donnant la direction du fluide. Cette représentation est souvent utilisée sur des coupes 2D.

Texture-based visualization, ajoute des textures à la visualisation de l’écoulement afin de lui donner de la densité et une idée du déplacement (LARAMEE et al., 2004) (voir la Figure 2.25c et la Figure 2.26c).

Geometric visualization, introduit des objets géométriques qui traduisent le comportement du fluide (LARAMEE et al., 2004), comme c’est le cas des *streamlines*, *streaklines*, *pathlines*, *isosurfaces*, etc. (voir la Figure 2.25d). Ce type de représentation donne une continuité et une définition spatiale plus grande que celle des flèches de la *direct visualization*, car elle introduit une notion de trajectoire.

D’après LARAMEE et al. (2004), ces différents types de visualisations des écoulements ont des avantages et des inconvénients divers selon l’objectif recherché et les dimensions prises en compte pour la représentation (2D – 2.5D – 3D). La *direct visualization* est d’utilisation simple et intuitive, néanmoins, elle est difficilement applicable aux représentations 3D car son rendu devient moins compréhensible, tel que montré dans la Figure 2.26a. Quant à la *geometric visualization*, ses résultats favorisent la représentation dans les dimensions 2D, 2.5D et 3D. La trajectoire des fluides est communiquée d’une façon plus claire avec une continuité qui permet de relier son origine et son extrémité (voir la Figure 2.26b), néanmoins, elle peut présenter des problèmes d’occlusion dûs à la

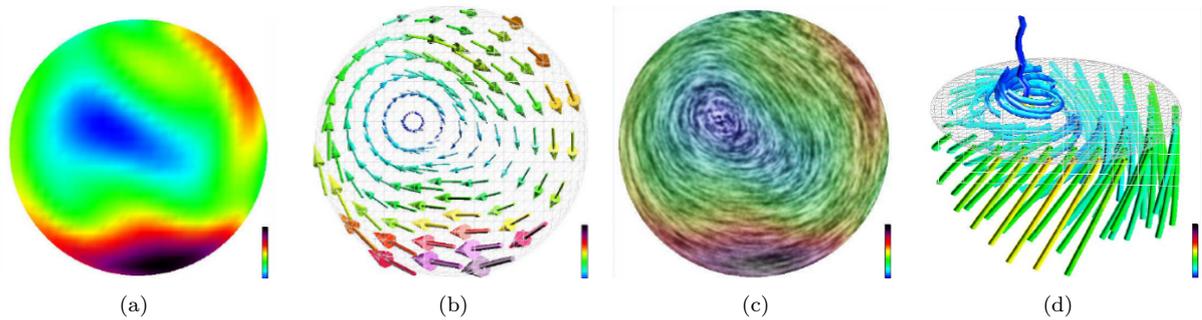


FIGURE 2.25 – Exemples des méthodes de visualisation 2D : (a) *Direct visualization – colors* (b) *Direct visualization – arrows* (c) *Textured-based visualization* (d) *geometric visualization*. (LARAMÉE et al., 2004).

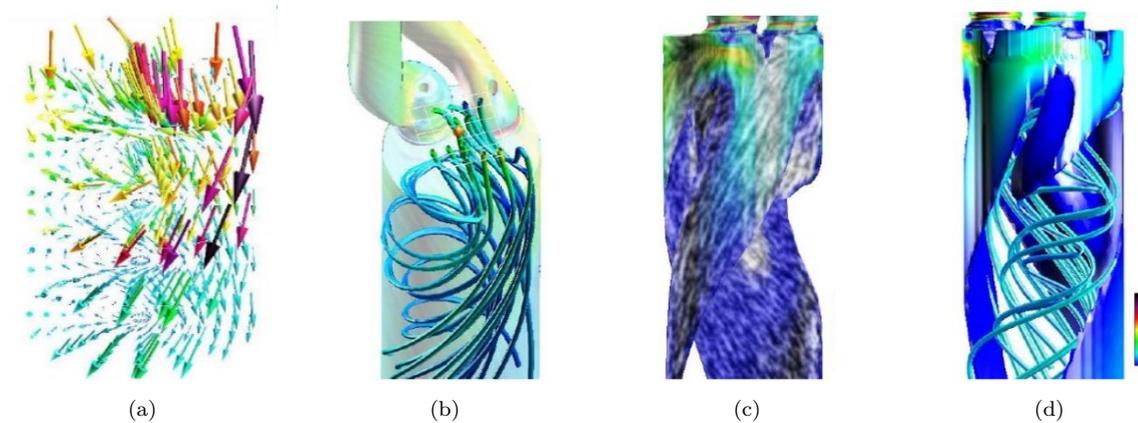


FIGURE 2.26 – Exemples de méthodes de visualisation 3D : (a) *Direct visualization – arrows* (b) *geometric visualization* (c) *Textured-based visualization on a isosurface* (d) *geometric visualization streamlines and an isosurface* (LARAMÉE et al., 2004).

quantité et proximité des données. Pour LARAMÉE et al. (2004) l'inconvénient de cette méthode réside dans la difficulté de représenter la totalité des données dans le rendu à cause du fait que certaines sont cachées par occlusion. Au contraire, dans la *textured-based visualization* la totalité des données peuvent être communiquées. Elle est facilement applicable aux rendus 2D, et pour les représentations 3D elle peut être combinée avec un objet géométrique, comme c'est le cas de la Figure 2.26c) où le rendu est présenté par une isosurface qui définit la trajectoire du fluide et une texture qui ajoute une densité.

Deuxième groupe de visualisations :

La *feature-based visualization* est une synthèse et un assemblage des données de caractéristiques similaires qui ne montrent que l'information pertinente pour le chercheur

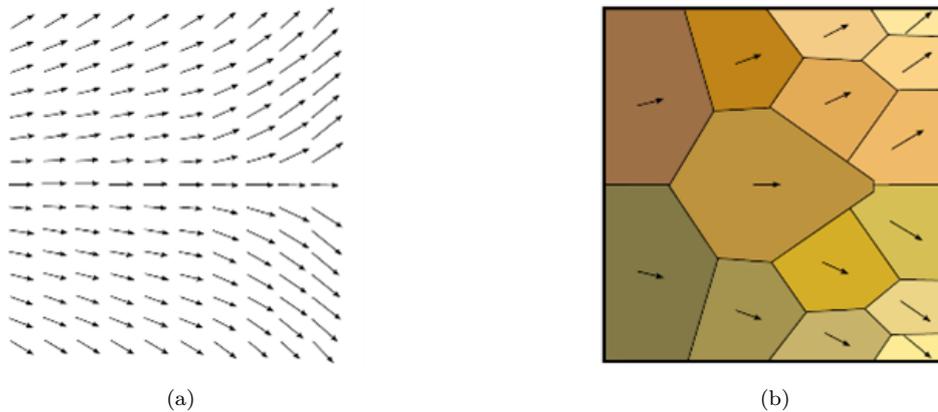


FIGURE 2.27 – (a) Assemblage des vecteurs vers (b) une zone des vecteurs moyens (SALZBRUNN, JANICKE et al., 2008).

(SALZBRUNN, JANICKE et al., 2008). Cette méthode aide à classifier l’information et à l’épurer afin de clarifier l’analyse et communiquer des phénomènes tels que les tourbillons.

A la différence de la *feature-based visualization*, la ***partition-based visualization*** donne un résultat global du comportement du fluide dans son environnement (SALZBRUNN, JANICKE et al., 2008). Cette représentation n’est pas forcément classée selon son degré d’intérêt et elle tente aussi de communiquer une abstraction de l’ensemble des éléments.

Il y a, de façon générale, deux techniques de *partition-based visualization* évoquées par SALZBRUNN, JANICKE et al. (2008), qui présentent différentes propriétés du comportement du fluide. La première est la méthode *cluster-based*, qui regroupe les données des vecteurs de comportements similaires dans une zone de valeurs moyennes. Elle est la méthode la plus utilisée au moment de représenter le comportement brut du fluide (voir la Figure 2.27).

La deuxième méthode est l’*integral-line-based*, qui regroupe les lignes qui présentent un comportement similaire quant à leurs origines et destinations, ce qui génère un volume indicatif du comportement, de la trajectoire et de la direction du fluide (voir la Figure 2.28).

2.3.3.2 Visualisation illustrative

Cette technique vise à communiquer le rendu d’une façon plus claire et compréhensible en se basant sur des techniques d’expression visuelle réalisées à la main des enjeux pris en compte par les visualisations scientifiques traditionnelles (présentées précédemment). Elle est donc classée selon deux caractéristiques qui répondent aux deux disciplines évo-

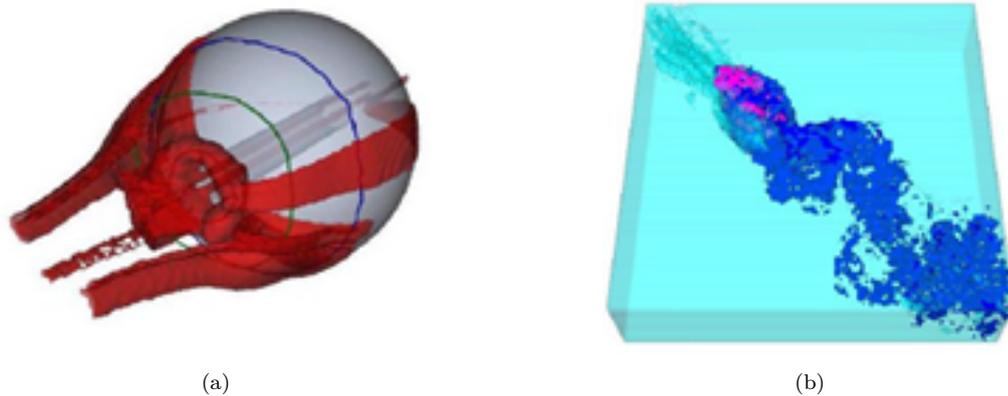


FIGURE 2.28 – Exemples de la méthode *Integral-lined based* : (a) *Streamlines predicates* (SALZBRUNN et SCHEUERMANN, 2007) and (b) *pathlines predicates* (SALZBRUNN, GARTH et al., 2008) cités par SALZBRUNN, JANICKE et al. (2008).

quées précédemment, la première liée à l'écoulement et la deuxième à la visualisation (BRAMBILLA et al., 2012). En plus, BRAMBILLA et al. (2012) proposent une classification différente de la classification traditionnelle, car, bien qu'elle soit bien comprise par les experts dans le domaine de la visualisation scientifique, elle n'est pas tout à fait claire pour les non-experts. Ils optent donc pour une classification basée sur les types des données que l'utilisateur veut voir sur le rendu :

Raw data, est la représentation directe des données brutes résultantes lors de la prise d'information, qu'elles soient basées sur des mesures ou des simulations.

Integral structures, permet d'analyser et communiquer le comportement résultant du fluide, il est souvent communiqué par des structures de lignes ou surfaces.

Flow features, c'est la synthèse d'un assemblage des données, qualifiée comme une particularité pertinente par celui qui génère le rendu et qui peut être communiquée par différents moyens de visualisation.

Nous trouvons donc des représentations qui utilisent des éléments des visualisations traditionnelles, mais qui diffèrent d'elles par le but à atteindre via l'expression visuelle (BRAMBILLA et al., 2012), tel que dans la Figure 2.29a, où le phénomène tourbillonnaire est représenté par une abstraction des données légèrement colorée tandis que la vitesse et l'orientation de la totalité du fluide sont communiquées par des flèches qui ont des variations de tailles et qui attirent l'attention sur l'expression du rendu. Nous trouvons dans la Figure 2.29a le jeu des colorations et des transparences qui interagissent afin de communiquer l'écoulement en valorisant l'expression visuelle.

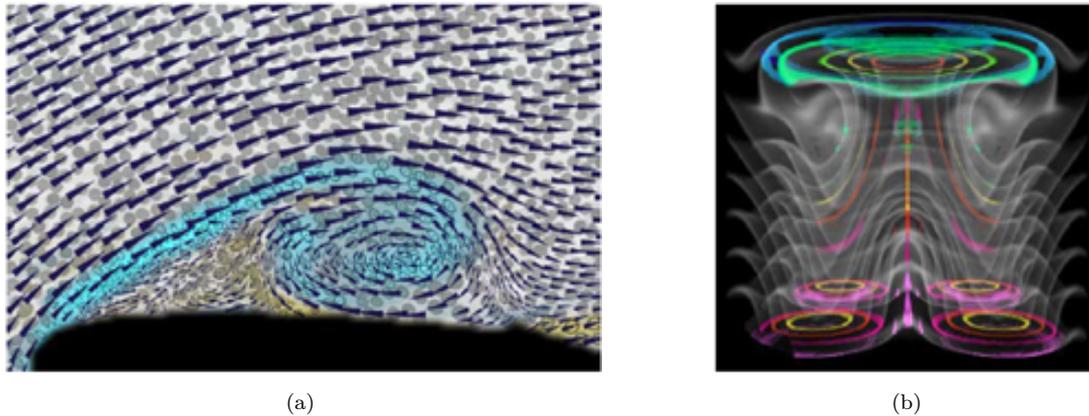


FIGURE 2.29 – (a) visualisation 2D du comportement du fluide (KIRBY et al., 1999) (b) Colorations pour exprimer les données de température résultantes de la simulation d’une plaque de cuisson. Le magenta représente la zone la plus chaude (la plaque) et le bleu l’air plus frais (SVAKHINE et al., 2005) (SALZBRUNN, GARTH et al., 2008).

D’après BRAMBILLA et al. (2012), la *raw data* permet de communiquer d’une manière claire et efficace l’information des données du comportement du vent dans le plan 2D, néanmoins dans les représentations 3D surgissent des problèmes liés à la compréhension visuelle et spatiale de l’information communiquée, ce qui correspond aux remarques de la *direct visualization* évoquées précédemment. Quant aux *integral structures*, elles permettent une meilleure compréhension des écoulements car elles introduisent une trajectoire continue du fluide. Dans les méthodes de visualisation illustratives, à la différence des méthodes traditionnelles, les lignes tentent d’être plus fluides, avec des variations dans leurs épaisseurs, des illuminations et des ombres qui aident à définir des volumétries avec une impression moins rigide, comme on le voit dans la Figure 2.30a. Néanmoins, comme nous l’avons déjà évoqué, cette méthode peut entraîner des problèmes visuels liés à l’occlusion de la géométrie. Cela peut être traité en assemblant les informations ayant des caractéristiques similaires afin de réduire le nombre d’objets affichés et de permettre ainsi une compréhension plus claire des principaux effets singuliers et de leurs relations avec l’ensemble des données communiquées (voir la Figure 2.30b). Cela peut être aussi traduit sur des surfaces résultantes de groupes de données, qui, à l’aide de transparences et colorations, communiquent à la fois les particularités et généralités d’un ensemble de données comme le montre la Figure 2.30c.

BUERGER et al. (2009) présentent des exemples de visualisations par des surfaces, qui avec des propriétés de déformation peuvent transmettre le comportement des fluides

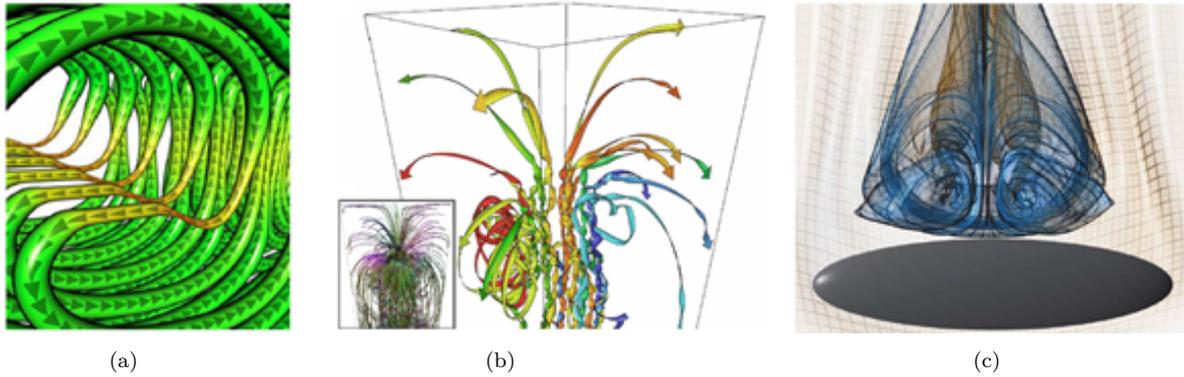


FIGURE 2.30 – (a) Rendu avec illumination, coloration et texture indicative de la direction (STOLL et al., 2005) (b) Comparaison visualisation traditionnelle et illustrative (CHEN et al., 2011). Visualisation du fluide avec des transparences (c) (HUMMEL et al., 2010).

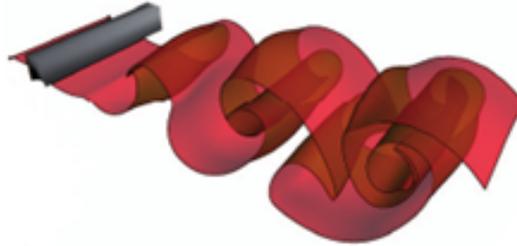


FIGURE 2.31 – *Streak surfaces* (BUERGER et al., 2009).

en environnements 3D (voir la Figure 2.31). Elles peuvent être rendues avec différentes textures et caractéristiques visuelles et, en présentant la totalité du fluide, aider à sa compréhension.

Nous trouvons un exemple clair de la méthode *flow features* dans le travail de KASTEN et al. (2011). Ils nous présentent l’enveloppe synthétisée d’un tourbillon en bleu avec deux couches, l’extérieur qui a des traces floues, et un intérieur avec des tubes, qui contiennent son squelette en tubes rouges (voir la Figure 2.32).

Le Tableau 2.3 synthétise les types de représentation utilisés pour visualiser les résultats de simulations aérauliques présentés dans cette sous-section.

2.3.4 Animations basées sur les représentations scientifiques

L’architecture est expérimentée et vécue par des corps en mouvement, par les flux et dynamiques qui s’y déroulent à travers le temps (MOLONEY, 2009). Les représentations vidéo-graphiques permettent d’ajouter une dimension temporelle aux images statiques. Cette

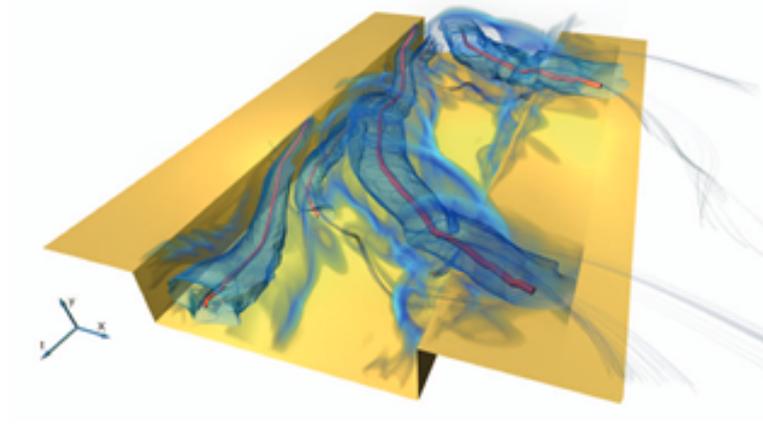


FIGURE 2.32 – Synthèse d’un tourbillon (KASTEN et al., 2011).

TABLE 2.3 – Synthèse des rendus scientifiques du vent.

Traditionnelles	Illustrative	Description
<i>Direct visualization</i>	<i>Raw Data</i>	Affiche l’information de façon plus intuitive et directe. Très clair pour l’analyse et la communication 2D. Confus en 3D.
<i>Texture visualization</i>		Permet de visualiser l’ensemble des données. Peut être présenté en 2D avec une coupe et en 3D sur un objet géométrique.
<i>Geometric</i>	<i>Integral structures</i>	Information qui présente la trajectoire et le comportement du vent en 2D et 3D.
<i>Feature-based Partition-based</i>	<i>Flow features</i>	Peut être combinée avec les méthodes précédentes afin de synthétiser et clarifier l’information exprimée.



FIGURE 2.33 – Résultats des simulations aérauliques superposées aux images réelles (GIRALDO et al., 2018).

dimension offre la possibilité de visualiser l'évolution des dynamiques des usagers dans un lieu ainsi qu'entre eux et l'espace même, les différents modes d'appropriation du lieu, les variations environnementales tout au long d'une journée (DROZD, 2011). Cela permet de ne pas se limiter aux trois dimensions spatiales visibles des volumes. De plus, la vidéo permet d'étudier les projets architecturaux dans leur contexte, lié à leurs environnements (bâtis et non bâtis) et leurs dynamiques. Ce type de représentations permet également de mettre en relation la dimension sonore avec les éléments observables, composante qui est propre à chaque environnement mais qui est régulièrement omise au moment d'aborder l'aménagement d'un espace (REGNAULT-BOUSQUET, 2001).

Nous présentons un exemple des effets du vent exprimés à travers une restitution vidéo-graphique, où les résultats objectifs des simulations aérauliques sont superposés aux images réelles du site d'étude. Cela permet afin de communiquer l'évolution du comportement du vent dans l'espace et de le mettre en relation avec les sensations exprimées par les usagers du site (GIRALDO et al., 2018). Les effets sont exprimés tant d'un point de vue immersif, que d'un point de vue surplombant qui exprime les relations d'une manière plus globales (voir la Figure 2.33).

BERGER et CRISTIE (2015) présentent un exemple de visualisation des résultats des simulations en réalité virtuelle. Afin de donner aux concepteurs un outil pour visualiser le comportement dynamique du vent autour des bâtiments et leur permettre de se déplacer et manipuler la maquette numérique, ils utilisent un écran divisé en différentes vues qui permettent d'observer en même temps différentes scènes ou comportements, en cherchant une discussion ou un design collaboratif entre les concepteurs (Figure 2.34).

Un autre exemple se trouve dans les cartes de prévision météorologiques telles que celles de VENTUSKY (p. d.) (voir la Figure 2.35) où les données sont exposées afin de

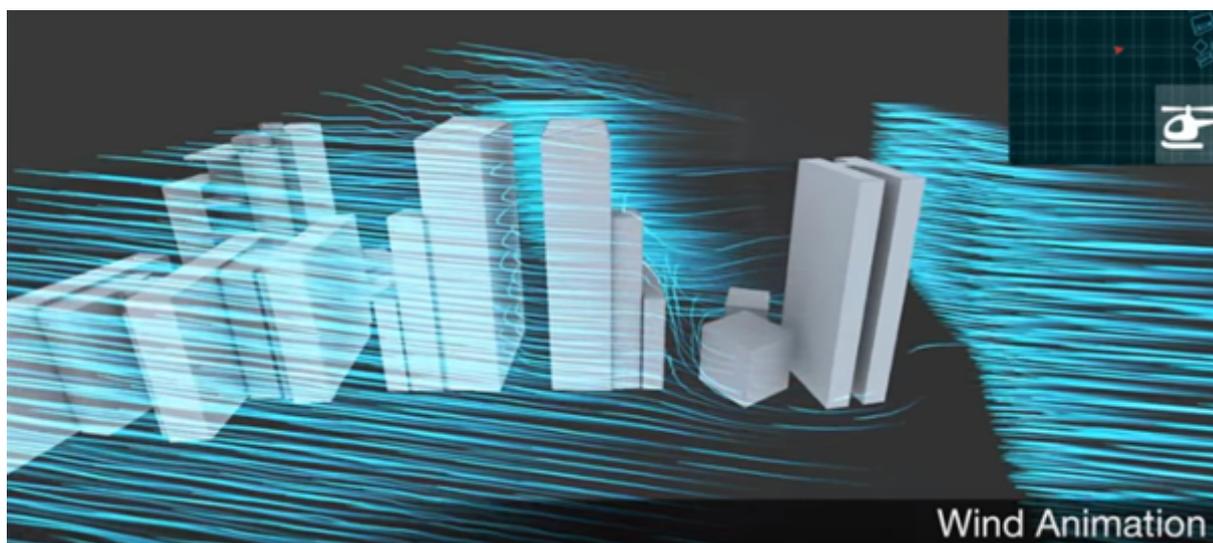


FIGURE 2.34 – Animation du résultat d’une simulation CDF en réalité virtuelle (BERGER et CRISTIE, 2015).

connaître et prévoir des événements climatiques au niveau global. Elles sont donc communiquées à une échelle continentale qui permet d’analyser les effets et phénomènes climatiques interdépendants au niveau des pressions, températures, couverture nuageuse du ciel, précipitations et vent. Pour représenter ce dernier, ils utilisent des lignes blanches qui contrastent avec les colorations résultant des données dans la carte. Les lignes du vent peuvent être affichées avec des épaisseurs différentes, ce qui permet différentes expressions en fonction du résultat visuel cherché.

Nous trouvons dans les deux premiers exemples que le dynamisme est utilisé pour rendre visible le parcours du vent, néanmoins il n’est pas utilisé pour différencier et communiquer la vitesse résultante du vent. Cette vitesse reste donc constante tout au long de la trajectoire sans mettre en relief les effets produits par les formes ou rugosités des éléments. Dans la carte de prévision météorologique, la vitesse est illustrée par les colorations du fond de carte, et il y a une correspondance au niveau des traces dynamiques, tant au niveau de leur vitesse que dans leur taille de propagation et leur concentration. Elles sont donc plus étendues aux endroits de grande vitesse, et beaucoup plus courtes et moins marquées dans les zones opposées.

En conclusion de cette partie, nous retenons que la visualisation de l’écoulement du vent représente un intérêt dans les domaines de l’architecture et de l’urbanisme car elle permet de comprendre et expliquer le comportement du phénomène. Il nous semble donc intéressant d’exprimer les effets résultants de l’interaction du vent avec son environnement,

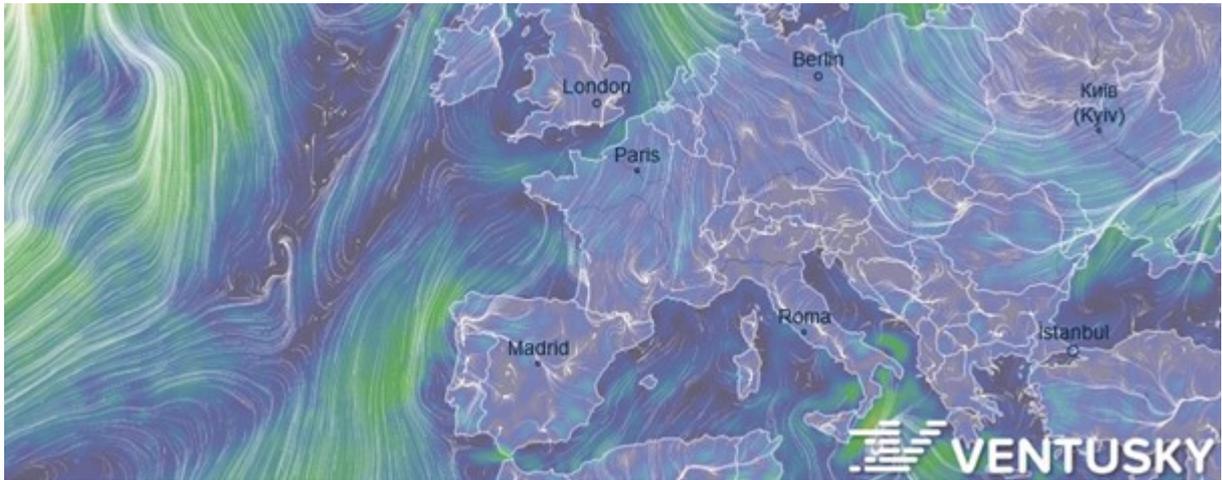


FIGURE 2.35 – Carte de vent dynamique (VENTUSKY, p. d.).

et de les rendre évidents dans la dynamique des lignes qui représentent l'écoulement du phénomène. Nous avons utilisé ce type de représentation pour rendre visible l'écoulement du vent lors de notre première expérience (chapitre 5). Dans le chapitre suivant, nous présentons le contexte général de la réalité virtuelle, ainsi que les représentations tactiles et visuelles du vent qui ont été explorées dans ces systèmes.

RESTITUTIONS TACTILES DU VENT EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Sommaire

3.1	Le contexte de la réalité virtuelle	73
3.1.1	Nature de l'environnement virtuel	74
3.1.2	Immersion et interaction	75
3.1.3	Étapes de la démarche de conception d'un système de RV . . .	79
3.1.4	La présence en RV	79
3.1.4.1	Mesures subjectives	80
3.1.4.2	Mesures physiologiques	80
3.1.4.3	Mesures comportementales	80
3.2	La réalité virtuelle en architecture et urbanisme	81
3.3	Visualisations de l'écoulement du vent en réalité virtuelle . .	83
3.4	Représenter le vent par le toucher en réalité virtuelle	85

3.1 Le contexte de la réalité virtuelle

La finalité de la réalité virtuelle (RV) d'après FUCHS (1996), repris par FUCHS et al. (2006a), est « *de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité **sensori-motrice** et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel* ».

Il y a deux éléments à discuter, selon FUCHS et al. (2006a), dans cette définition. D'abord, le type d'interactions entre la personne et l'environnement virtuel. Il doit comprendre, en plus des activités cognitives, des actions sensori-motrices, c'est-à-dire que la personne perçoit et agit physiquement avec l'environnement et les éléments virtuels. Le second élément concerne la nature de l'environnement virtuel, qui est catalogué entre (I) une simulation de certains aspects du monde réel, (II) un monde symbolique (voir la sous-section 3.1.1) et (III) un monde imaginaire.

La réalité virtuelle peut nous transporter vers différents univers en persuadant nos corps, grâce à la stimulation sensorielle, d'accepter cette nouvelle réalité (LA VALLE, 2017). Elle peut nous placer dans un dessin animé, sur un autre continent ou même dans un autre univers. Ses utilisations étaient limitées dans les années 1990, du fait notamment des coûts élevés des équipements, ce qui l'a orientée vers un groupe spécifique d'utilisateurs. De nos jours, les avancées technologiques liées aux technologies embarquées dans les *smartphones*, la haute définition des écrans, le développement des casques de RV, et la production à faible coût, ont favorisé le progrès des systèmes de réalité virtuelle. Ceci a permis d'ouvrir des possibilités infinies sur de différents champs d'étude.

En plus de la personne qui utilise le système et l'environnement virtuel, il y a un troisième élément qui fonctionne comme un médiateur bidirectionnel entre les deux précédents, l'interface. Les principaux questionnements des systèmes de réalité virtuelle se trouvent autour de ces trois éléments. FUCHS et al. (2006a) désignent ce trio d'éléments comme la boucle « perception, cognition, action » (voir la Figure 3.1). Les personnes perçoivent et interagissent avec l'environnement virtuel à l'aide d'interfaces physiques qui, permettent la stimulation des sens humains d'une part, et captent et transfèrent l'information vers le système virtuel d'autre part. Ces trois éléments ne peuvent pas être dissociés au moment de concevoir une application de RV et ils ont le même degré d'importance dans le système.

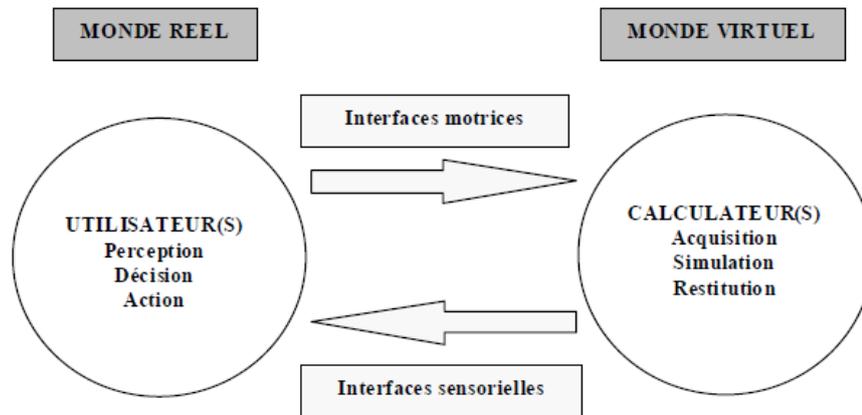


FIGURE 3.1 – Schéma de la boucle «perception, cognition, action» (FUCHS et al., 2006a).

3.1.1 Nature de l’environnement virtuel

Une simulation de certains aspects du monde réel. D’après FUCHS et al. (2006a), le potentiel de la RV se situe dans l’objectif de modifier les éléments de la « vraie » réalité. C’est une erreur habituelle de prétendre simuler l’environnement virtuel avec le plus grand « degré de réalisme ».

La RV nous permet d’aller au-delà du monde réel. Elle permet par exemple de rendre visibles des éléments qui ne le sont pas dans la réalité, tels que l’écoulement du vent.

C’est dans ce contexte que se présente **un monde symbolique** (FUCHS et al., 2006a) qui permet d’ajouter à l’environnement virtuel des symboles qui aident à faciliter la compréhension ou l’analyse des éléments présents dans la scène. Ce sont par exemple les colorations ou objets géométriques trouvés dans les représentations scientifiques des fluides (voir sous-section 2.3.3).

FUCHS et al. (2006b) soulignent qu’il ne faut donc pas se poser la question d’un « degré de réalisme » en termes de similitude de l’environnement virtuel au monde réel. L’idée que la RV doit produire une copie identique du monde réel est limitante et réductrice face aux diverses possibilités qu’elle peut offrir. Au delà de cette idée de tenter de reproduire de la façon la plus détaillée la réalité, FUCHS et al. (2006b) s’intéressent à « **l’optimum d’I²** (immersion et interaction) **fonctionnelles** (expliqué dans la sous-section 3.1.2) liées à l’application ».

Dans cette même optique, LAVALLE (2017) explique qu’un jeu vidéo simple ou avec un style de dessin animé, peut être aussi efficace, même préférable, qu’un jeu photoréaliste.

Il montre la simplicité des premiers jeux vidéo, tel que *Donkey Kong* (MIYAMOTO, 1981) (voir la Figure 3.2a), où *Jumpman* (après Mario) devait sauver la damoiselle du gorille. L'industrie des jeux vidéo a exploré des résultats visuels plus proches de la réalité, tel que ce fut le cas des *First-Person Shooter* (FPS), que l'on trouve par exemple dans le jeu *Doom* (id SOFTWARE, 1993) (voir la Figure 3.2b). Nous retrouvons cette recherche dans des jeux plus récents, comme par exemple dans le jeu *Assassin's Creed* (UBISOFT, 2020) (voir la Figure 3.2c). Malgré ces avancées en termes graphiques, il existe des jeux modernes très populaires qui ont opté pour la simplicité graphique, tels qu'*Angry Birds* (« Angry Birds », 2009) (voir la Figure 3.2d), dont les exigences en matière de processeurs et de cartes graphiques sont plus réduites et qui peuvent être joués dans des *smartphones* basiques. Ceci est un exemple du fait qu'il ne faut pas supposer qu'un jeu sera reçu plus favorablement s'il a un rendu plus photoréaliste. Cette oscillation de simplicité et complexité graphique au fil temps démontre qu'un rendu plus complexe n'est pas nécessairement meilleur qu'un rendu simple. Cela est extrapolable aux rendus en RV.

LAVALLE (2017) souligne aussi le fait qu'au fur et à mesure qu'un dispositif est plus efficace en termes de résolution spatiale, champ de vue, latence, etc., le risque qu'il puisse rendre malades les utilisateurs lors de la simulation est plus élevé. Il explique que lorsque l'environnement virtuel est plus fortement similaire à la réalité, les signaux envoyés à nos centres nerveux sont plus intenses et cela nous rend plus sensibles aux incohérences entre la réalité et l'environnement virtuel simulé.

Cela explique pourquoi nous avons choisi d'utiliser de modèles simples non texturés lors de nos deux expériences (voir le chapitre 5 et le chapitre 6).

3.1.2 Immersion et interaction

L'homme se trouve en interaction constante avec l'environnement où il est immergé. Il perçoit le monde, traite les informations et prend des décisions, ou réagit. Partant d'une conception anthropocentrique (car l'application du système est orientée vers l'homme), l'immersion et l'interaction (I^2) se trouvent au cœur du système de réalité virtuelle (voir la Figure 3.3).

Les auteurs analysent le processus d'interfaçage, qui permet l'immersion et l'interaction, en trois niveaux. D'abord, on parle du lien physique entre l'homme et le monde virtuel. Dans ce cas il s'agit d'une *immersion et interaction sensori-motrices*, car la communication entre le système de RV et l'homme se fait directement par des éléments qui permettent la stimulation des sens de l'utilisateur (avec des informations provenant de

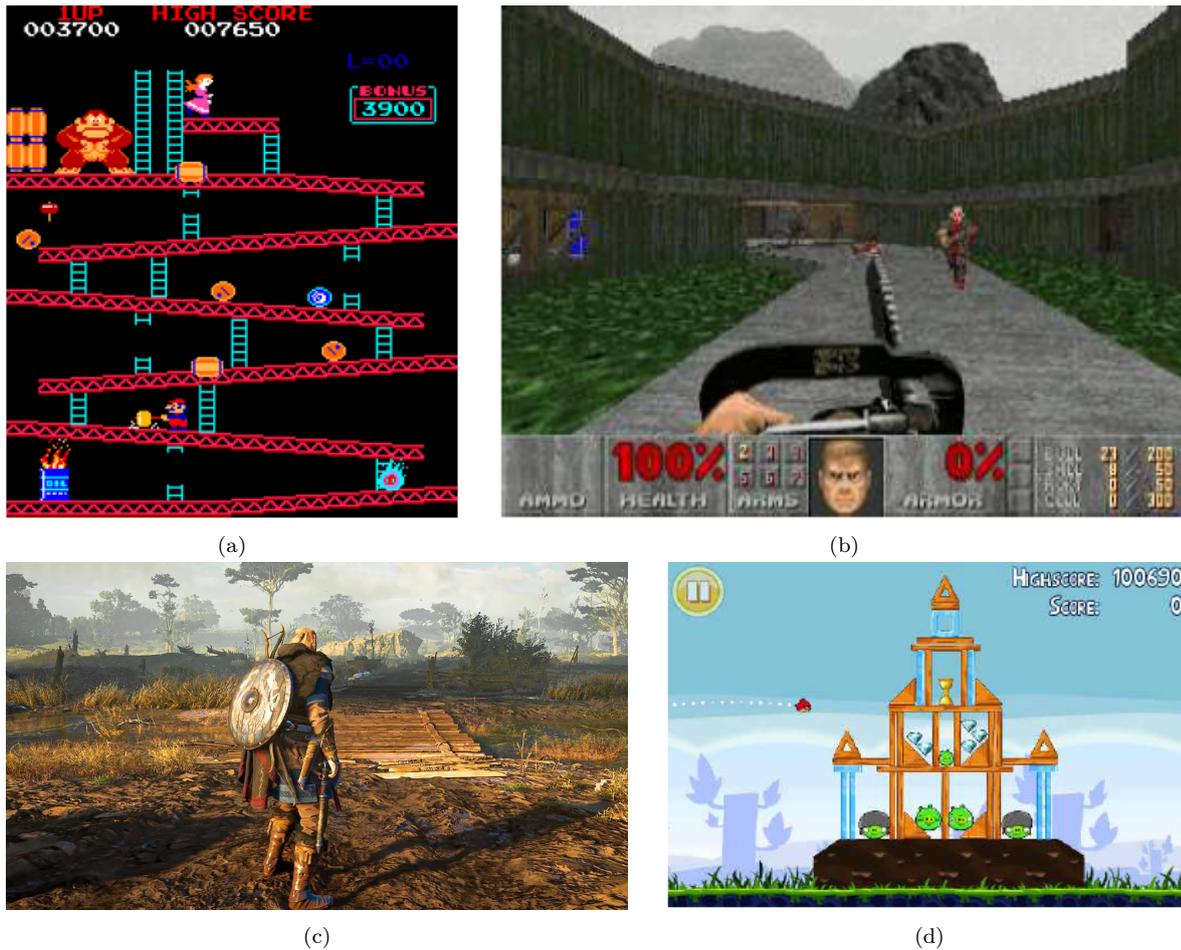


FIGURE 3.2 – Quelques visualisations de jeux de vidéo (a) *Donkey Kong* (MIYAMOTO, 1981), (b) *Doom* (id SOFTWARE, 1993), (c) *Assassin's Creed* (UBISOFT, 2020), (d) *Angry Birds* (« Angry Birds », 2009).

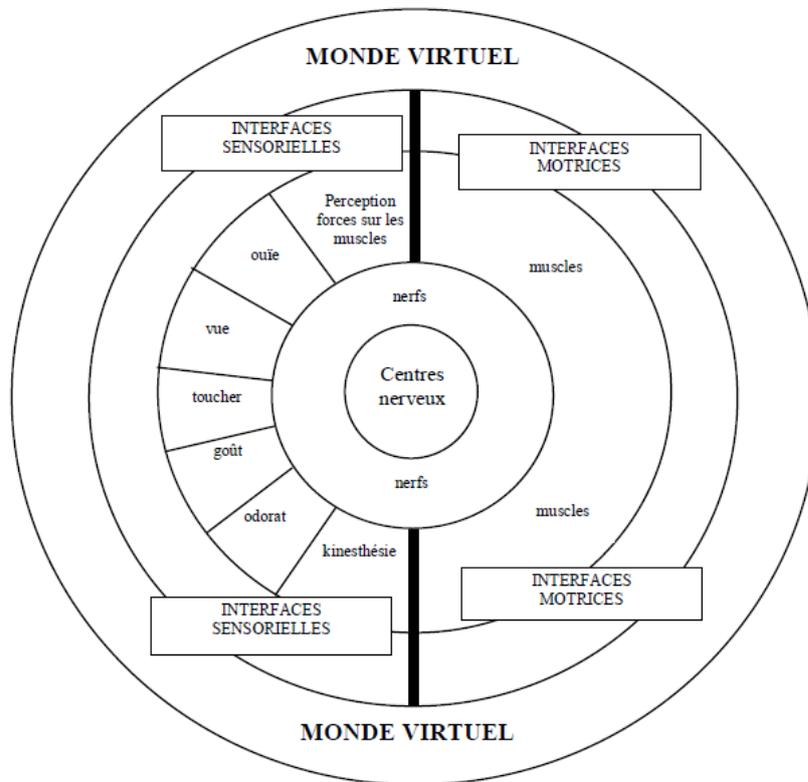


FIGURE 3.3 – Schéma anthropocentrique de la perception de l'environnement virtuel (FUCHS et al., 2006a).

l'application virtuelle) et qui captent ses réactions motrices et les transfèrent vers le monde virtuel.

Le deuxième niveau est *l'immersion et interaction cognitives*, qui concerne, comme son nom l'indique, les activités liées à l'acquisition des connaissances et leurs interprétations. Ici il ne s'agit plus de penser uniquement à l'interface en termes de matériel physique, mais de penser à la façon dont la personne va l'utiliser comme résultat de ses processus cognitifs. Le concepteur doit penser à ces processus et comment ils vont permettre une immersion et une interaction plus efficace. FUCHS et al. (2006b) divisent ces processus en deux catégories : les Schèmes Comportementaux Importés (SCI) et les métaphores (avec ou sans substitution sensori-motrice).

Les SCI font référence au transfert des connaissances et comportements déjà acquis dans le monde réel afin de créer des situations « pseudo-naturelles » dans l'environnement virtuel. De leur côté, les métaphores portent sur l'utilisation d'une image symbolique qui remplace une action dans le monde virtuel.

Le troisième et dernier niveau est *l'immersion et interaction fonctionnelles*, qui englobent les activités que la personne devra développer dans l'environnement virtuel. FUCHS et al. (2006a) groupent les possibles interactions en réalité virtuelle selon leur nature, en quatre comportements de base nommés « *Primitives Comportementales Virtuelles* » (PCV) qui se divisent en :

- **Observer le monde virtuel** : dans cette interaction (contrairement aux trois autres) la personne a une attitude « passive » face à l'environnement virtuel en termes d'actions exécutées pour, par exemple, aller chercher des informations. Il s'agit de s'orienter et de comprendre l'environnement.
- **Se déplacer dans le monde virtuel** : consiste à contrôler la translation et (en fonction du type de déplacement) la rotation du sujet afin de parcourir l'environnement virtuel.
- **Agir sur le monde virtuel** : il s'agit de manipuler, transformer ou contrôler des objets virtuels.
- **Communiquer avec autrui ou avec l'application** : pour interagir avec d'autres personnes, avec des avatars virtuels, ou avec l'application (par exemple pour réaliser des modifications dans sa configuration ou exécuter des ordres).

3.1.3 Étapes de la démarche de conception d'un système de RV

FUCHS et al. (2006a) proposent la démarche suivante pour la conception des applications de systèmes de réalité virtuelle :

- La première étape consiste à caractériser les I² fonctionnelles pour l'application. Le concepteur doit définir chacune des actions possibles que la personne pourra développer dans l'environnement virtuel.
- En fonction de cette caractérisation il faut ensuite déterminer les PCV utiles.
- la troisième étape est consacrée à la conception des Interfaces Comportementales basée sur les I² cognitives de chaque PCV défini, en cherchant une efficacité en termes des I².
- L'étape quatre est la conception des « *Aides Logicielles Comportementales* » (ALC) afin d'améliorer les I² cognitives et les I² sensorimotrices. Les ALC permettent au cerveau de l'utilisateur d'accepter les incohérences sensori-motrices trouvées dans l'application.
- La dernière étape est la conception du logiciel de RV, qui comprend la programmation du système, la modélisation de l'environnement virtuel, etc.

3.1.4 La présence en RV

FUCHS et al. (2006a) expliquent la présence comme le résultat de l'immersion (réservée à « une description des caractéristiques objectives d'un dispositif de réalité virtuelle ») sur le comportement du sujet. Ils présentent donc cette relation des termes immersion/présence, comme une dualité « objectif/subjectif ».

LAVALLE (2017) explique que le sentiment de présence augmente lorsque le sujet semble ignorer l'interférence entre le monde virtuel et le monde réel et qu'il se retrouve pris par l'environnement simulé.

La présence a un caractère multidimensionnel, elle regroupe des aspects tant psychologiques (liées au fait de se sentir dans l'environnement virtuel) que sensori-moteurs. Dans ce contexte, FUCHS et al. (2006a) la considèrent comme un facteur dynamique qui prend en compte tant les environnements réels que virtuels au moment de l'immersion. Les auteurs divisent les méthodes d'analyse et d'évaluation de la présence en trois groupes : les mesures subjectives, les mesures physiologiques et les mesures comportementales, qui sont décrites ci-après.

3.1.4.1 Mesures subjectives

Il s'agit de questionnaires qui cherchent à qualifier le sentiment de présence lors de la simulation, en utilisant, par exemple, des questions qui font appel à la mémoire du sujet pour comparer les situations déjà vécues dans le monde réel avec la situation actuelle. Un exemple est le questionnaire proposé par SLATER et al. (1998).

3.1.4.2 Mesures physiologiques

Ce type de mesures a pour objectif de capter et interpréter les variations, ou réactions du corps face à l'expérience en RV et aux stimuli reçus. Ces réactions peuvent être analysées au niveau de la transpiration, de variations de température, du rythme cardiaque, de la tension musculaire, entre autres. Des exemples de ces mesures sont présentés par WIEDERHOLD et al. (2001), et MEEHAN et al. (2001) (cités par FUCHS et al., 2006a).

3.1.4.3 Mesures comportementales

FUCHS et al. (2006a) séparent ce type de mesures entre les actions réflexes et le contrôle sensori-moteur. Les premières recouvrent les réactions qui peuvent refléter le sentiment d'être dans la scène virtuelle des personnes, tels que les mouvements résultant d'une surprise, ou le fait de chercher à éviter un objet virtuel (SUTHERLAND, 1968 cité par FUCHS et al., 2006a).

Le contrôle sensori-moteur fait référence aux attitudes adoptées dans le monde virtuel par rapport aux attitudes adoptées dans le monde réel avec des conditions similaires ou équivalentes.

Les auteurs soulignent aussi que la performance des personnes dans les activités développées dans le monde virtuel n'est pas un facteur déterminant de la présence. Cela dépend de facteurs externes (tels que les interfaces) et de facteurs internes (comme l'habileté des participants).

Maintenant que nous avons présenté le contexte de la réalité virtuelle, nous nous concentrons sur ses applications dans l'architecture et l'urbanisme, et dans les représentations du vent dans ces dispositifs.

3.2 La réalité virtuelle en architecture et urbanisme

L'architecture est un domaine où les représentations visuelles sont fortement exploitées. Les modèles tridimensionnels, tant physiques que numériques, et les images de synthèse, sont des outils qui permettent aux architectes d'exprimer leurs idées et de matérialiser leurs conceptions. Il est donc naturel que le domaine de la RV présente un grand intérêt et potentiel dans les champs de l'architecture et de l'urbanisme.

D'après FUCHS et al. (2006c) la plupart des applications de RV portent sur la visite d'espaces intérieurs. Les *Primitives Comportementales Virtuelles* (PCV) les plus importantes sont donc l'observation et la navigation dans l'espace. Néanmoins, peut-être en raison de la familiarité des architectes avec les images de synthèse, ces visites se limitent souvent à des images (photo-réalistes) fixes calculées hors ligne.

En matière d'urbanisme, à la différence de l'architecture, les représentations sont moins concentrées sur les éléments esthétiques et les détails. Ici l'intérêt se focalise plus sur la morphologie urbaine, les relations, connexions, tensions, dans différentes dimensions du projet : spatiale, sociale, politique, économique, environnementale, etc. C'est pourquoi les visualisations 3D de la ville cherchent une vraisemblance plutôt que le réalisme.

La réalité virtuelle présente un potentiel pour la représentation des ambiances urbaines, entendues comme le résultat de l'interaction avec l'environnement bâti, les phénomènes physiques et sensibles (tels que la lumière, les sons ou le vent) et la personne qui habite et perçoit l'espace (voir la Figure 3.4).

Un exemple est donné par TAHRANI et MOREAU (2008) qui ont étudié la relation entre l'éclairage naturel, l'espace et la perception humaine, dans un environnement virtuel et l'ont comparé à la même perception dans le monde réel (voir la Figure 3.5). Dans une perspective similaire, VIGIER (2015) (présenté dans la sous-section 2.2.2) a étudié la suggestion de différentes situations climatiques en fonction des variations chromatiques et du contraste dans un monde virtuel.

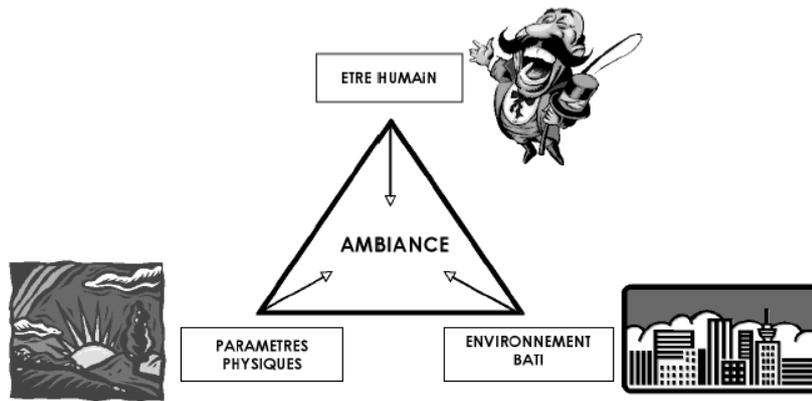


FIGURE 3.4 – L’ambiance architecturale et urbaine (FUCHS et al., 2006c).

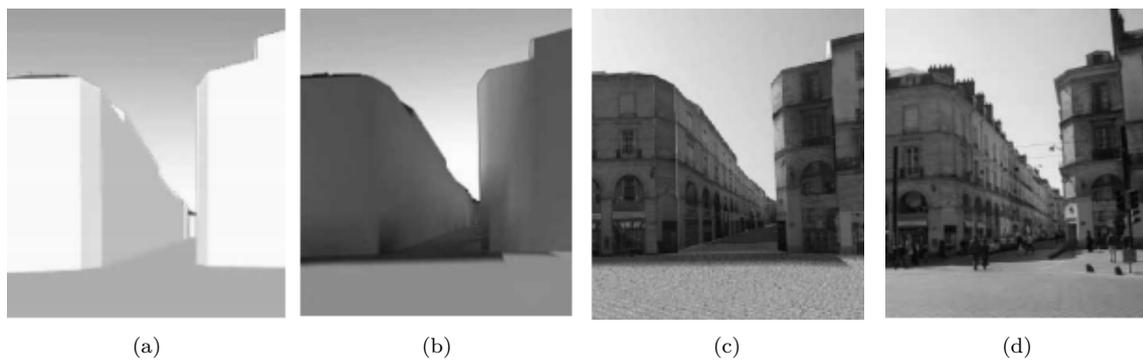


FIGURE 3.5 – Suggestion des ambiances lumineuses (TAHRANI et MOREAU, 2008) (a) morphologie modèle 3D, (b) volumétrie avec de la lumière, (c) texture photo-réaliste, (d) photographie de l’espace réel.



FIGURE 3.6 – Visualisation CFD dans une scène de RV (YAN et al., 2020).

3.3 Visualisations de l'écoulement du vent en réalité virtuelle

Les résultats des simulations CFD ont été utilisés dans des scènes de RV afin d'exploiter leur potentiel d'immersion et de visualisation. YAN et al. (2020) proposent ainsi une méthode pour utiliser les résultats de simulations CFD dans une scène de RV à l'aide d'outils BIM (*Building information modeling*) (voir la Figure 3.6 et la Figure 3.7). Ils ont comparé la visualisation des résultats sous trois différents logiciels (*Autodesk CFD*, *3DsMax* et *Stringray* pour l'environnement virtuel). Ils ont évalué la précision, l'expérience et le rendu graphique. Ils ont conclu que les huit participants ont qualifié l'expérience comme « excellente » avec le système de RV et les graphiques et la précision comme « bons ». Ils soulignent ainsi le potentiel de la RV pour la visualisation CFD ainsi que pour le déroulement des projets architecturaux.

FU et al. (2009) ont développé un outil d'interface afin de convertir le contexte de *ParaView* dans un environnement immersif de RV. La Figure 3.8 montre deux exemples d'applications. HOSOKAWA et al. (2016) proposent un outil pour la conception architecturale pour afficher le résultat des simulations CFD dans une scène virtuelle (voir la Figure 3.9).

La visualisation en réalité virtuelle montre donc un potentiel pour analyser les résultats visuels d'une simulation CFD d'autre point de vue, en immersion. Nous présentons ci-après les recherches portant sur la restitution tactile du vent en RV.

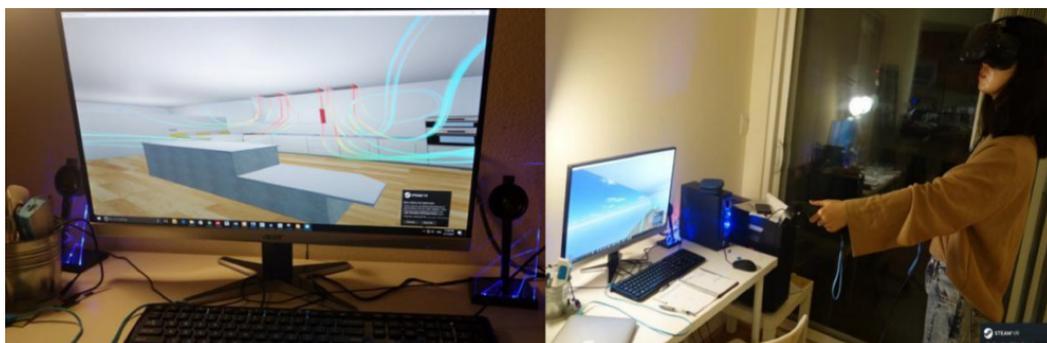


FIGURE 3.7 – Participant explorant un espace intérieur avec l'écoulement du vent à l'aide d'un *Head-mounted display* (HMD) (YAN et al., 2020).

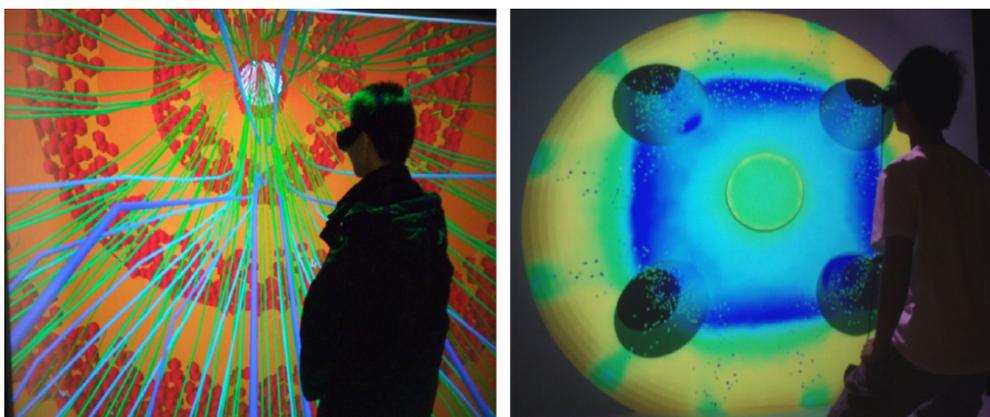


FIGURE 3.8 – Participant analysant le résultat d'une simulation CFD avec un écran de projection (FU et al., 2009).

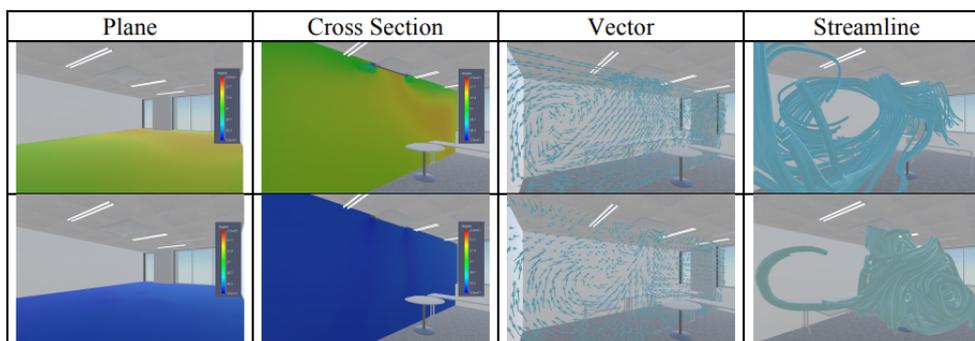


FIGURE 3.9 – Différents exemples de visualisations de résultats CFD dans une scène de RV (HOSOKAWA et al., 2016).

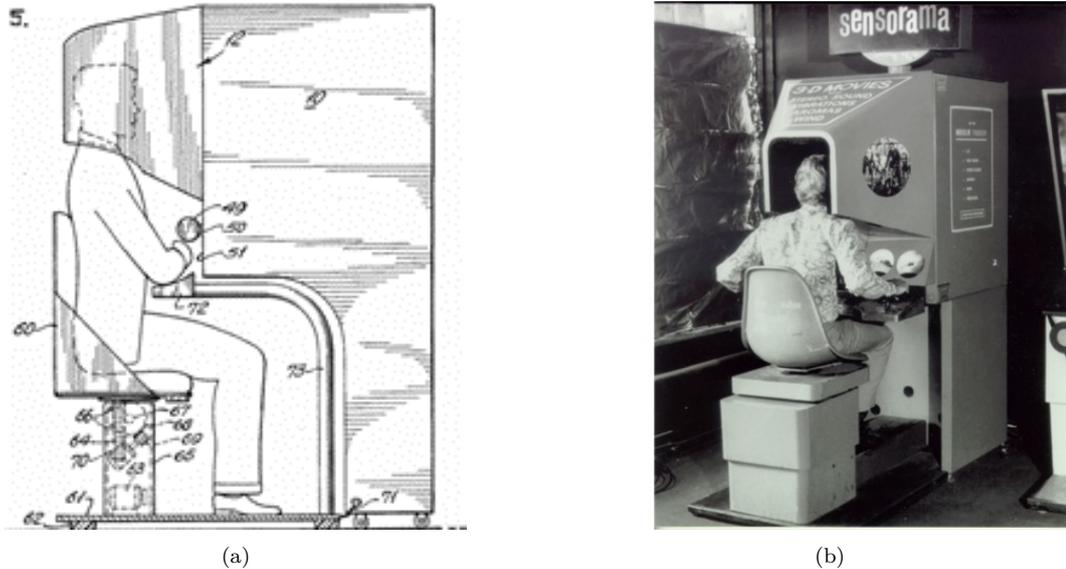


FIGURE 3.10 – Sensorama, (a) schéma (HEILIG, 1961) et (b) photographie, extraite de l'URL suivante : <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensorama>.

3.4 Représenter le vent par le toucher en réalité virtuelle

Il existe des exemples de stimulation des capteurs corporels tactiles, à l'aide de mouvements d'air, dans le champ de la réalité virtuelle. Ces exemples cherchent principalement à augmenter le sentiment de présence des personnes dans les environnements virtuels.

Le Sensorama, inventé par HEILIG (1961), avait l'intention de projeter des films en stimulant les différents sens des utilisateurs. Le dispositif a été équipé de ventilateurs qui soufflaient du vent sur les visages des spectateurs et permettaient la propagation des odeurs afin de donner l'impression d'être présent dans le film (voir la Figure 3.10).

MOON et KIM (2004) ont proposé le *WindCube*, un dispositif cubique qui entoure les utilisateurs. Il possède trois niveaux à des hauteurs différentes où se localisent les ventilateurs qui soufflent vers l'intérieur. Les deux niveaux inférieurs se composent de huit ventilateurs tandis que le niveau supérieur en comprend quatre (Figure 3.11). Dans les niveaux inférieurs chaque ventilateur est séparé du suivant par un angle de 45° , ce qui permet de localiser les quatre points cardinaux et les directions intermédiaires. Leurs expériences préliminaires ont montré que les participants n'arrivaient pas à faire une distinction de la direction du vent quand les ventilateurs avaient un écart angulaire inférieur à 45° . Ils ont aussi remarqué que la perception de 3 ~ 5 ventilateurs allumés en même temps était

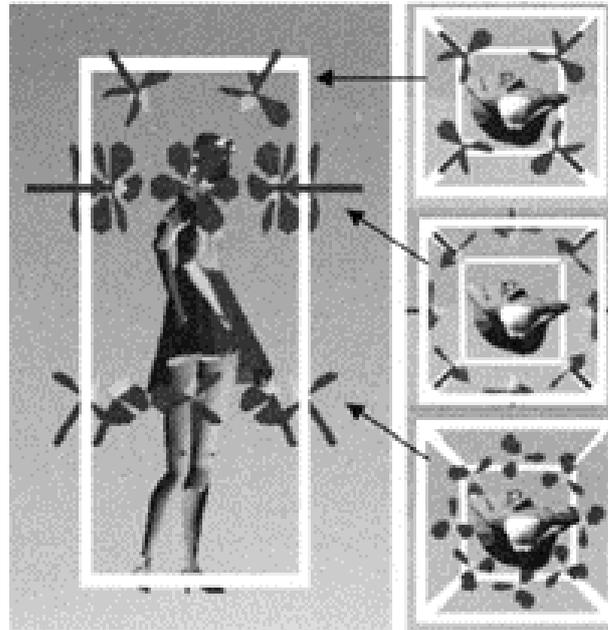


FIGURE 3.11 – *WindCube* (MOON et KIM, 2004).

plus naturelle que celle d'un seul ventilateur. Selon les résultats des expériences présentées par MOON et KIM (2004), ce dispositif a accompli son but de permettre d'évaluer le niveau de présence en fonction du vent. Les résultats montrent une augmentation du sentiment de présence en utilisant les ventilateurs. Néanmoins il est invasif visuellement et par conséquent les auteurs remarquent qu'il peut distraire les utilisateurs, en réduisant, paradoxalement, leur sentiment de présence dans la scène virtuelle.

CARDIN et al. (2007) proposent un dispositif nommé « *Head Mounted Wind* » qui se compose d'un casque avec huit ventilateurs à 30cm de la tête de l'utilisateur. Ils cherchent à valider la perception de l'orientation du vent dans un simulateur de vol (voir la Figure 3.12)

LEHMANN et al. (2009) comparent les effets produits par deux dispositifs, le premier avec deux ventilateurs de 8cm de diamètre et $72m^3/h$ de débit d'air montés sur un casque porté par l'utilisateur ; le deuxième avec deux ventilateurs statiques de 15cm de diamètre et $256m^3/h$ localisés en face l'utilisateur à une distance de 90cm (voir la Figure 3.13). Ils évaluent trois situations, la première sans effets tactiles du vent, la deuxième avec les ventilateurs statiques et la troisième avec le vent résultant des ventilateurs montés sur le casque. Le pré-test a montré une tendance selon laquelle les ventilateurs statiques favorisent davantage la sensation de présence que ceux montés sur le casque. Ils trouvent

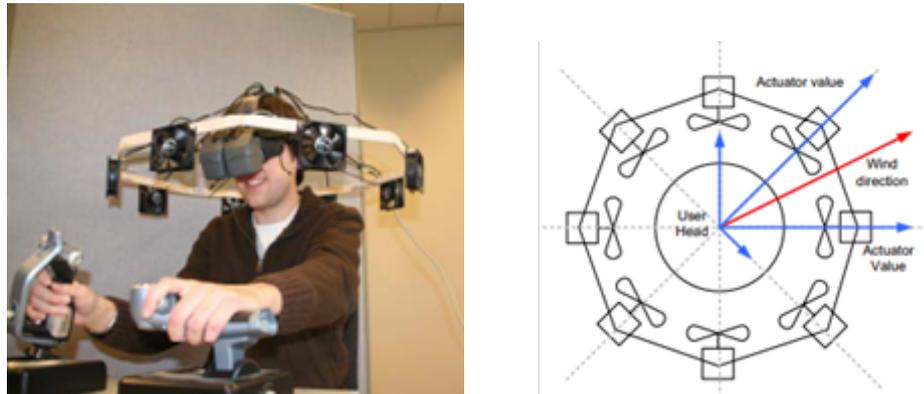


FIGURE 3.12 – *Head Mounted Wind* (CARDIN et al., 2007).

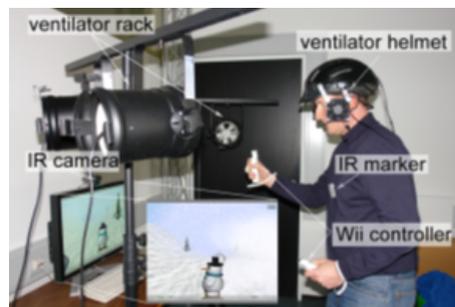


FIGURE 3.13 – Comparaison entre des ventilateurs localisés en face de l'utilisateur et des ventilateurs sur le casque (LEHMANN et al., 2009).

que la simulation du vent, pour les deux situations évaluées, augmente le sentiment de présence. L'analyse qualitative montre que 75% des sujets préfèrent la deuxième situation avec les ventilateurs statiques. Quelques-uns notent ne pas ressentir le phénomène sur leur corps quand ils utilisent le casque. Une autre raison de préférer les ventilateurs statiques est le désagrément provoqué par les ventilateurs montés sur le casque qui vibrent et font trop de bruit.

KOJIMA et al. (2009) énoncent trois problèmes principaux des dispositifs utilisant des ventilateurs statiques face aux utilisateurs. Le premier est l'espace de travail limité car les ventilateurs, orientés vers un point, deviennent moins efficaces quand l'utilisateur bouge. Le deuxième est la distance entre la source et l'utilisateur, car plus la distance est grande et plus la puissance requise augmente, ce qui signifie une augmentation dans les coûts et la consommation énergétique du dispositif. Le troisième problème, lié au précédent, est la localisation du vent, car au fur et à mesure que la distance augmente, le vent est moins focalisé et il devient plus difficile d'identifier son orientation. Ils trouvent que les



FIGURE 3.14 – Casque adapté avec des hautparleurs et ventilateurs (KOJIMA et al., 2009).

parties de la tête les plus sensibles aux stimuli du vent sont les oreilles, c'est pourquoi ils utilisent un casque avec quatre petits hautparleurs qui sont équipés de petits ventilateurs et conduisent l'air par des tubes qui stimulent de façon auditive et tactile les oreilles des sujets (voir la Figure 3.14).

RIETZLER et al. (2017) proposent une expérience tactile qui accompagne un rendu audiovisuel. Ils développent un dispositif pneumatique qui peut tourner de 270° autour de la tête des utilisateurs, ce qui permet des variations dans les directions du vent (voir la Figure 3.15). Pour faire un courant d'air simulant le vent, ils utilisent de l'air comprimé. Les auteurs notent un problème potentiel avec le dispositif HMD à cause de l'effet de masque dans la zone des yeux, ce pourquoi ils suggèrent d'utiliser un avatar avec des lunettes afin d'augmenter l'expérience. De même, ils suggèrent de mettre des gants car le vent n'est pas restitué sur les mains. Ils évaluent l'immersion des sujets selon deux scénarios, le premier avec la simulation du vent et le deuxième sans elle. Ils confirment que l'utilisation des courants d'air produit une augmentation statistiquement significative du sentiment de présence dans la scène de RV.

NAKANO et YANAGIDA (2017) s'intéressent à la perception de la direction du vent. Ils analysent le vent incident sur la partie frontale, latérale et arrière de la tête (voir la Figure 3.16). Ils ont comparé les JNDs (Just Noticeable Differences) dans la discrimination de la direction du vent produit par un seul ventilateur par rapport au vent uniforme produit par un group de ventilateurs. Pour ce faire ils utilisent un rail qui permet de déplacer la source du vent et d'analyser les diverses positions, avec un point de référence 0° et six autres points d'étude entre -30° et $+30^\circ$ pour chaque position. Les participants

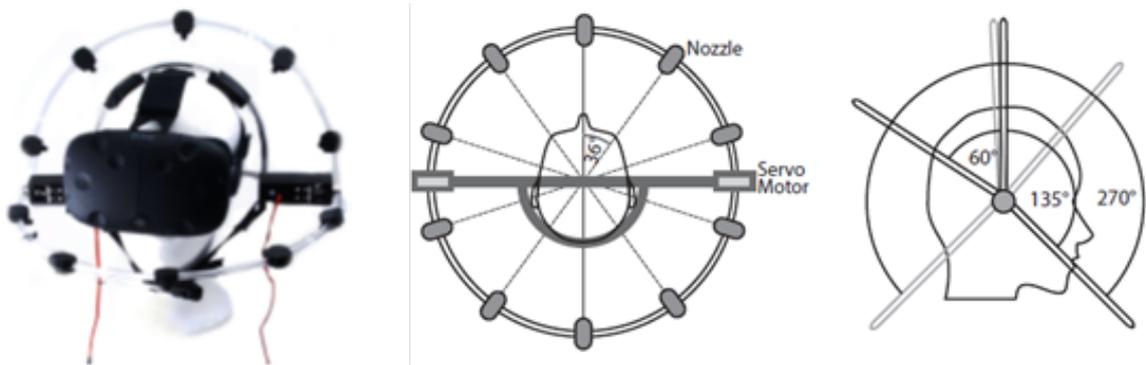


FIGURE 3.15 – Dispositif VAir (RIETZLER et al., 2017).

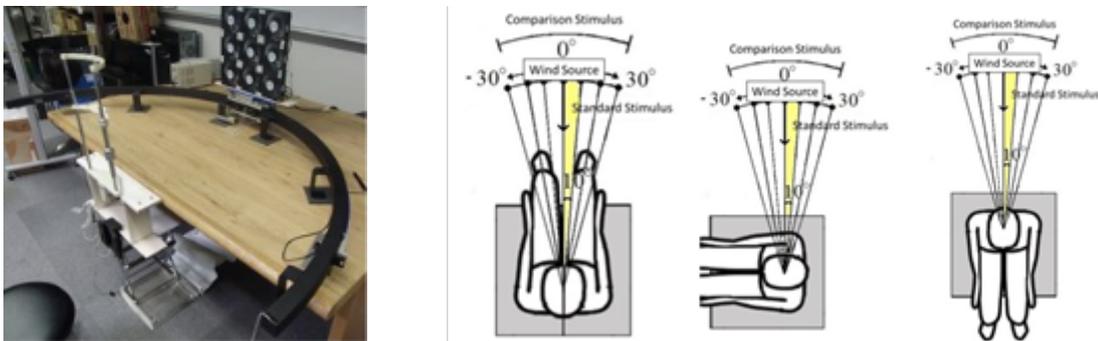


FIGURE 3.16 – Groupe de ventilateurs pour évaluer la perception de la direction du vent (NAKANO et YANAGIDA, 2017).

sont situés à 80cm de la source du vent, ce dernier est soufflé à une vitesse de $1,3\text{m/s}$. Ils ont constaté que le JNDs pour un seul ventilateur était de 4.29° pour la zone frontale de la tête, 11.30° pour la zone latérale, et 4.41° pour l'arrière. Dans le cas du groupe de ventilateurs, le JNDs était de 7.85° pour la zone frontale, 11.24° pour la zone latérale et 6.78° pour l'arrière. Ils remarquent que le vent incident sur le côté latéral de la tête est plus difficile à identifier car cette partie n'est pas bilatéralement symétrique.

VERLINDEN et al. (2013) ont développé un prototype à destination des athlètes qui se préparent dans un dispositif de réalité virtuelle. D'après leurs expériences préliminaires, la vitesse minimale du vent pour se sentir immergé est de 3m/s . Leur prototype utilise huit ventilateurs avec un diamètre de 40.6cm et un flux d'air de $3652.87\text{m}^3/\text{h}$. Ils sont placés à une hauteur de deux mètres au dessus de l'utilisateur. Le diamètre de la structure circulaire qui supporte les ventilateurs est de 4m (voir la Figure 3.17). La moitié des participants utilise le dispositif, d'abord sans les ventilateurs, et après un questionnaire, avec les ventilateurs. L'autre moitié fait l'expérience dans l'ordre inverse. Les résultats

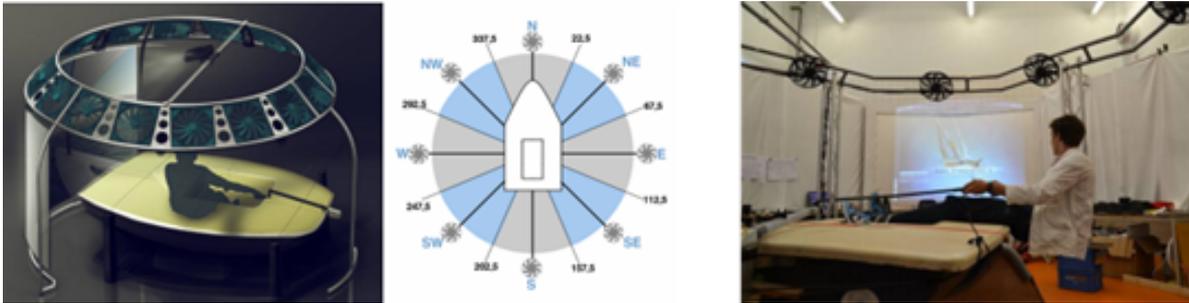


FIGURE 3.17 – Dispositif de restitution de vent de VERLINDEN et al. (2013).

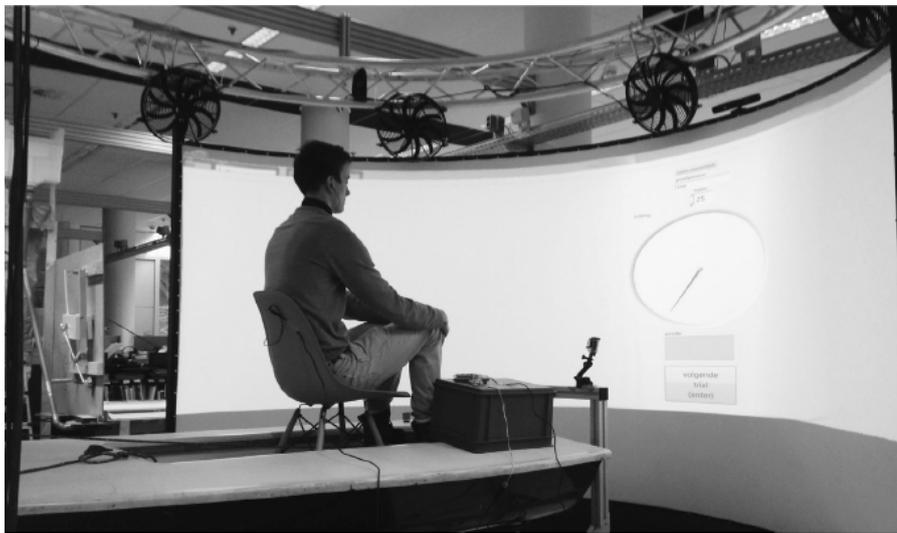


FIGURE 3.18 – Évaluation de la direction du vent pour les marins (PLUIJMS et al., 2015).

montrent que l'expérience avec les ventilateurs est plus immersive pour les deux groupes. Le principal problème relevé par les utilisateurs est la puissance de ventilateurs. Ils ont remarqué que la force devrait être plus élevée pour ressembler aux conditions réelles.

PLUIJMS et al. (2015) réutilisent le dispositif de VERLINDEN et al. (2013) afin d'évaluer la perception de la direction et de la force du vent entre les navigateurs experts, les navigateurs moins expérimentés et les inexpérimentés comme sujets de contrôle (voir la Figure 3.18).

Plus récemment, ITO et al. (2019) ont réalisé une démonstration intégrant des stimuli visuels, sonores et tactiles avec un nombre limité de ventilateurs et en tenant compte des effets inter-modaux (voir la Figure 3.19). Ils remarquent que l'utilisation des restitutions sonores et visuelles changent fortement la perception du vent.

KULKARNI et al. (2012) utilisent des approches croisées entre des simulations numé-

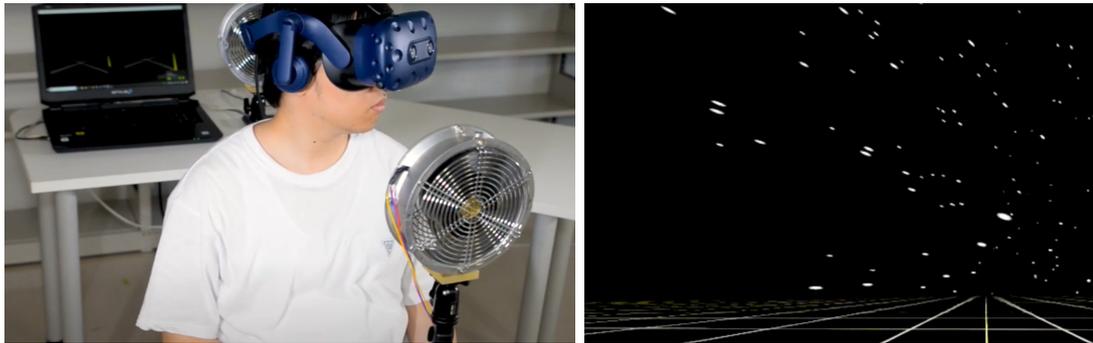


FIGURE 3.19 – Restitution tactile et audiovisuelle du vent (ITO et al., 2019).

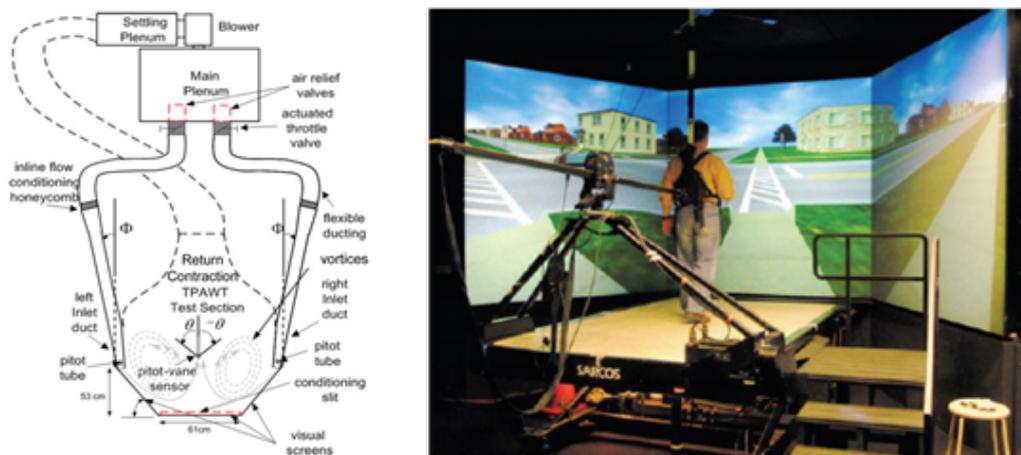


FIGURE 3.20 – Soufflerie à échelle (KULKARNI et al., 2012).

riques et physiques afin de connaître le comportement du vent dans un dispositif de RV. Leur but principal est de développer un dispositif qui utilise le vent, la température et les odeurs afin d'augmenter le nombre de sens stimulés et donc accroître le sentiment de présence en RV. L'air est dirigé par deux conduits latéraux vers les écrans obliques du dispositif, ce qui engendre des tourbillons et dirige le flux de vent vers l'utilisateur en fonction de son angle d'incidence et de sa vitesse.

Cette question a été également explorée par l'entreprise PHILIPS qui a lancé le produit « amBX » (p. d.) *gaming peripherals* (voir la Figure 3.21). Ce dispositif, équipé de haut-parleurs, d'effets lumineux et de deux ventilateurs, prétend accompagner les joueurs tout au long des jeux vidéo pour augmenter leur expérience et leur sentiment de présence dans le scénario virtuel.

Les dispositifs « VirWind » (p. d.) et « ZephVR » (p. d.) suivent le même principe. Le premier utilise quatre tours de 1.80m de hauteur qui contiennent quatre ventilateurs



FIGURE 3.21 – Dispositif de restitution du vent amBX (« amBX », p. d.).



(a)



(b)

FIGURE 3.22 – Dispositifs (a) « VirWind » (p. d.) et (b) « ZephVR » (p. d.)

chacune (voir la Figure 3.22a). Elles sont placées autour de l'utilisateur du dispositif. Le deuxième consiste en deux ventilateurs ajoutés au HMD afin de souffler vers le visage des utilisateurs (voir la Figure 3.22b).

En conclusion de ce chapitre, nous pouvons dire que les systèmes de réalité virtuelle partagent la dimension temporelle des représentations vidéographiques, avec leurs qualités, auxquelles ils ajoutent l'immersion et l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel. La réalité virtuelle permet donc d'étudier les perceptions et attitudes adoptées par les usagers dans la simulation d'un espace. Elle peut mettre en relation des éléments réels et des éléments virtuels. Cette faculté peut donner des pistes dans le processus de conception et de communication (MOLONEY, 2009). Elle offre également la possibilité de matérialiser virtuellement des phénomènes ou des situations non visibles, comme le vent. Comme nous l'avons présenté dans ce chapitre, les systèmes de réalité virtuelle permettent de rassembler différents types de rendu (visuel, sonore, tactile) dans le même dispositif. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à cette technologie pour

évaluer la perception des propriétés du vent sous différents types de représentations. Cela a soulevé un certain nombre de questions, qui sont abordées dans le chapitre suivant.

PROBLÉMATIQUE ET CADRE EXPÉRIMENTAL

Sommaire

4.1	Introduction	97
4.2	Problème	97
4.3	Hypothèses	98
4.4	Objectifs	100
4.5	Dispositif expérimental	100
4.5.1	Ventilateurs utilisés	101
4.5.2	Contrôle numérique des ventilateurs	105
4.6	Design des expériences	105

4.1 Introduction

Les représentations des phénomènes aérauliques dans les champs de l'architecture et de l'urbanisme sont principalement visuelles. Elles servent aux concepteurs à matérialiser ce phénomène invisible afin de l'étudier, l'analyser, le mesurer, et l'utiliser pour la prise de décisions.

Ces représentations, comme nous l'avons évoqué précédemment (voir la section 2.3), sont basées sur des schémas de fonctionnement qui permettent de connaître les principes basiques du vent, ainsi que sur des résultats de simulations qui contiennent plus d'informations quantitatives. Tous les deux sont présents dans l'élaboration des projets et permettent une discussion entre professionnels et l'avancement du travail.

Nous retrouvons ces représentations au moment de la communication du projet. D'un côté, les schémas tels que les exemples présentés par BUSTAMANTE et al. (2014), GANDEMER (1992, 1994) ou LAMBERTS et al. (2014), ont pour finalité d'expliquer comment le vent interagit avec les futurs projets, les avantages qu'il peut amener pour améliorer les conditions de l'environnement, ou a contrario, de rendre visibles des problèmes existants liés au vent. Ces représentations permettent de comprendre les principes physiques du phénomène, ses propriétés, telle que sa direction dominante ou une idée de son intensité, sans donner d'information quantitative.

De l'autre côté, nous trouvons les simulations aérauliques. Elles sont particulièrement utiles au moment d'analyser et de quantifier les dynamiques du vent dans le but d'enrichir le projet en fonction des choix morphologiques, conceptuels ou structuraux. Il s'agit pour cela de rendre visible les flux de vent, comme nous l'observons dans les différentes techniques de visualisation scientifique des écoulements aérodynamiques proposées par BRAMBILLA et al. (2012) et SALZBRUNN, JANICKE et al. (2008). Néanmoins, au moment de la diffusion du projet ces représentations peuvent être réductrices des conditions et propriétés sensibles du phénomène (BARNIAUDY, 2018).

4.2 Problème

Nous nous intéressons donc à l'expression des dimensions sensibles du vent au moment de la représentation du phénomène dans un processus de conception architecturale ou urbaine. Une flèche directionnelle représentant un flux aéraulique transmet une information quantitative mais ne stimule pas la sensibilité des personnes qui reçoivent cette informa-

tion. L'information donnée par la flèche est importante mais insuffisante pour comprendre l'intégralité du phénomène aéroulque.

Une expression sensible du vent pourrait augmenter l'information quantitative utilisée dans les projets et faciliter la contextualisation du résultat.

Les expressions suggestives du vent, telles que les expressions artistiques observées dans le cinéma ou la peinture, peuvent faire comprendre aux observateurs les différentes propriétés du phénomène sans donner d'information quantitative précise. Du fait qu'elles transmettent une information semblable à celle perçue dans un espace réel, elles peuvent être associées à des expériences similaires vécues précédemment. C'est pourquoi nous nous posons la question suivante :

Comment représenter les propriétés sensibles du vent d'un espace public afin de transmettre une information qui serait comparable à celle perçue sur site, permettant la compréhension de ses effets ?

4.3 Hypothèses

En nous appuyant sur les différents exemples d'expression du vent présentés précédemment, nous considérons que les représentations en architecture peuvent être augmentées par différents rendus du vent (tactiles, sonores, visuels) afin qu'elles puissent évoquer des situations semblables aux situations réelles. Les systèmes de réalité virtuelle ont montré un potentiel pour simuler les phénomènes d'ambiance d'un espace urbain. C'est pourquoi nous avons comme première hypothèse **qu'une représentation multisensorielle immersive du vent, à l'aide d'un dispositif de RV, peut permettre une compréhension des effets du phénomène en favorisant une stimulation de différents sens.**

Comme nous l'avons remarqué précédemment, les vues immersives facilitent la communication autour des projets. Elles aident à la compréhension tridimensionnelle de l'espace affiché, permettent aux spectateurs de s'identifier aux personnes qui effectuent des activités dans l'environnement représenté et de plus les invitent à être participants de la scène.

C'est l'un des avantages des moyens d'expression par la réalité virtuelle. Ils permettent d'utiliser les maquettes numériques pour immerger les utilisateurs dans l'environnement conçu et amplifier l'impression des effets attendus dans le projet par des moyens visuels, sonores et tactiles. Dans les environnements virtuels, l'observateur/participant est capable

d'interagir avec le monde numérique dans lequel il est immergé (MILGRAM et KISHINO, 1994). Il devient donc un acteur de l'environnement virtuel où il peut observer, se déplacer, agir et communiquer avec un autre acteur ou même avec l'application (FUCHS et al., 2006a).

D'après les études précédentes de la représentation tactile du vent (évoquées dans le chapitre 3), l'utilisation parallèle et simultanée du vent, tant dans le monde réel (au moyen de l'ajout du souffle du vent dans la salle d'expérimentation) que virtuel, permet d'augmenter le sentiment de présence dans les scènes virtuelles. En plus de montrer les effets mécaniques du vent sur les éléments de l'environnement et de faire entendre le bruit du vent, la réalité virtuelle peut proposer une stimulation des capteurs corporels par le toucher et augmenter ainsi le sentiment d'être présent dans la scène.

Nous pouvons avancer que dans les champs de l'architecture et l'urbanisme, le vent n'est pas un phénomène passif qui se manifeste seulement par ses effets mécaniques sur les éléments du contexte. Il peut être considéré comme un élément de la scène, visible en lui-même, qui exprime ses différentes propriétés.

C'est pourquoi nous proposons une deuxième hypothèse : **les restitutions du vent en réalité virtuelle** (entendues comme la restitution audiovisuelle des effets mécaniques plus une restitution tactile) **pourraient être augmentées par des traces graphiques qui matérialisent le comportement du vent dans l'espace, afin de nourrir les représentations de ce phénomène dans les champs de l'architecture et l'urbanisme**. Ces traces, basées sur des résultats de simulations numériques, pourraient permettre de mieux comprendre les propriétés du phénomène, notamment son orientation et sa vitesse.

Un autre intérêt de la réalité virtuelle est de ne pas tenter de reproduire la réalité telle qu'elle est, mais d'introduire des aspects ou des éléments pour la modifier (FUCHS et al., 2006a). Ces moyens créent des scénarios appropriés pour tenter d'introduire dans un environnement virtuel des éléments qui ne sont pas observables dans la réalité.

Finalement, nous nous intéressons à une restitution dynamique qui peut exprimer la nature changeante et inconstante du vent, sans se focaliser uniquement sur une situation critique ponctuelle. Cette restitution dynamique permet de prendre en compte les évolutions temporelles et sonores, en stimulant une perception multi-sensorielle du vent.

4.4 Objectifs

Nous avons donc comme objectif principal, pour évaluer ces hypothèses, de comparer et classer les différents moyens d’expression du vent utilisés dans une scène virtuelle, à savoir : la visualisation des effets mécaniques sur le contexte, la visualisation de l’écoulement du vent, la restitution sonore et les restitutions tactiles. Nous cherchons à savoir de quelle façon la restitution du vent peut être mieux comprise entre les différents types de représentation immersive en réalité virtuelle.

Notre intention est de produire un rendu qui cherche à provoquer chez les utilisateurs du dispositif virtuel une impression de la présence du vent et de ses effets. Il s’agit donc d’évaluer leurs compréhensions du phénomène afin d’identifier les rendus les plus adéquats.

En nous basant sur les différents éléments qui sont utilisés pour représenter les conditions aérauliques d’un espace urbain, et afin d’évaluer nos hypothèses, nous avons mis en place deux expériences différentes. D’abord, nous avons comparé la compréhension des effets aérauliques dans quatre types différents de représentations. Nous avons évalué les effets de ces représentations en termes de compréhension des propriétés du vent (force et direction) et du sentiment de présence dans la scène de RV (voir le chapitre 5). Dans un deuxième temps, nous avons évalué la perception de la force et de la direction du vent dans une scène virtuelle par comparaison avec l’échelle de Beaufort (voir le chapitre 6).

Nous présentons dans les sections suivantes les éléments et configurations utilisés pour définir notre dispositif expérimental et mener à bien nos deux expériences.

4.5 Dispositif expérimental

L’utilisation de ventilateurs (CARDIN et al., 2007 ; KOJIMA et al., 2009 ; LEHMANN et al., 2009 ; MOON et KIM, 2004 ; NAKANO et YANAGIDA, 2017 ; VERLINDEN et al., 2013), d’air comprimé (RIETZLER et al., 2017) ou d’une soufflerie à l’échelle (KULKARNI et al., 2012) ont été des moyens utilisés pour introduire le souffle du vent dans les dispositifs de réalité virtuelle, comme nous l’avons vu dans le chapitre 3.

L’un des facteurs qui différencie les expériences précédentes est la façon d’afficher la scène virtuelle, avec ou sans HMD. Ce facteur conditionne la définition de la localisation et de la distance des ventilateurs par rapport aux participants. D’autre côté, le HMD est un masque qui protège une portion significative du visage face de l’influence du vent. C’est la raison principale pour laquelle nous avons opté pour une solution sans l’utilisation d’un

HMD.

LEHMANN et al. (2009) ont observé que l'utilisation des ventilateurs statiques est préférable à l'utilisation des ventilateurs attachés sur le casque à cause des vibrations et bruits qui en résultent.

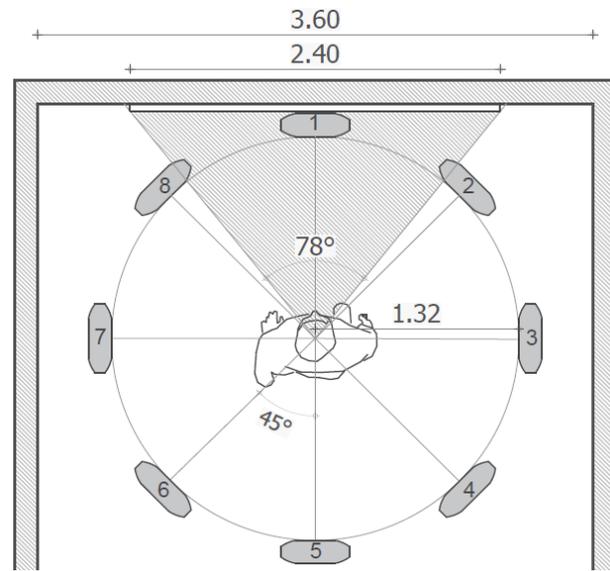
Quant à la disposition des ventilateurs dans le dispositif immersif, celle proposée par MOON et KIM (2004), donne un point de départ. CARDIN et al. (2007) et VERLINDEN et al., 2013, ont réutilisé la disposition en plan de huit ventilateurs, répartis sur un seul niveau (à la différence des trois niveaux utilisés par MOON et KIM (2004)), néanmoins leurs expériences différaient pour ce qui concerne l'échelle d'application (en termes de taille des ventilateurs et de localisation autour de l'utilisateur) et d'affichage de la scène virtuelle. CARDIN et al. (2007) ont adapté un casque avec de petits ventilateurs qui fonctionnent comme sources ponctuelles focalisées sur la tête des utilisateurs. Ils utilisent un HMD pour afficher l'environnement virtuel, ce qui, comme nous l'avons évoqué précédemment, empêche la stimulation tactile de la partie du visage recouverte par le casque. De leur côté, VERLINDEN et al. (2013) ont localisé leurs ventilateurs sur un cercle de $4m$ de diamètre autour de l'utilisateur avec une élévation de $2m$. Ils utilisent un projecteur sur un écran pour afficher la scène.

Nous nous sommes basés sur cette disposition pour localiser huit ventilateurs au sol dans la salle de réalité virtuelle de l'École Centrale de Nantes. Ils se trouvaient autour de l'utilisateur du dispositif à une distance de $1.32m$, comme le montre la Figure 4.1. Cette salle est équipée d'un écran de $1.80m$ de haut par $2.40m$ de large offrant un champ de vision horizontal de 78° (Figure 4.1a). En ce qui concerne l'audio, nous avons équipé les participants d'écouteurs *Bluetooth Plantronics-Backbeat Go 410* qui avaient une double fonction : permettre le rendu sonore de la scène virtuelle d'une part et d'autre part, grâce à la fonction d'annulation de bruit, réduire le bruit ambiant de la salle (résultant du fonctionnement des ventilateurs, relais, projecteur, etc.). Leur taille a été choisie pour ne pas empêcher l'influence du vent sur les oreilles des participants.

4.5.1 Ventilateurs utilisés

Nous avons cherché des ventilateurs en nous appuyant sur les caractéristiques de ceux utilisés par VERLINDEN et al. (2013), à savoir des ventilateurs de $40cm$ de diamètre. Nous avons utilisé le modèle « *ProBreeze Ventilateur de Sol 20"* » qui a un diamètre de $50.8cm$ et une puissance de $120W$.

Pour évaluer les caractéristiques du souffle produit par ce ventilateur, nous avons



(a)



(b)

FIGURE 4.1 – Localisation des ventilateurs dans la salle d'expérimentation (a) plan et (b) photographie de l'installation (GIRALDO et al., 2020).



FIGURE 4.2 – Anémomètre *kimo vt200* utilisé pour les mesures de la vitesse du vent des ventilateurs.

TABLE 4.1 – Vitesse globale moyenne et écart type avec le ventilateur *ProBreeze 20"* à la localisation de l'utilisateur.

	V1	V2	V3
Vitesse (<i>m/s</i>)	2,2	2,6	3,3
σ	0,10	0,08	0,15

réalisé une mesure de la vitesse du vent à l'aide de l'anémomètre « *kimo vt200* » (voir la Figure 4.2) localisé à la hauteur approximative du visage des participants et incliné vers le ventilateur frontal selon l'axe du ventilateur. La distance de l'anémomètre, selon cette élévation, était donc approximativement de $1.68m$ (voir la Figure 4.3). L'anémomètre a une fonction de calcul de la moyenne des données pendant une durée choisie. Nous avons pris dix valeurs pour chacune des trois vitesses de fonctionnement du ventilateur. Chaque valeur représente la moyenne des données captées pendant 10 secondes. La Figure 4.4 et le Tableau 4.1 montrent les valeurs moyennes de chaque vitesse.

Nous avons fait une mesure de la latence de la perception du vent entre le moment où les lames (complètement arrêtées) sont allumées jusqu'au moment où la personne ressent le flux d'air. Il y a une latence du vent d'une seconde à la source du ventilateur et elle augmente d'une autre seconde (valeur moyenne) pour chaque mètre de distance.

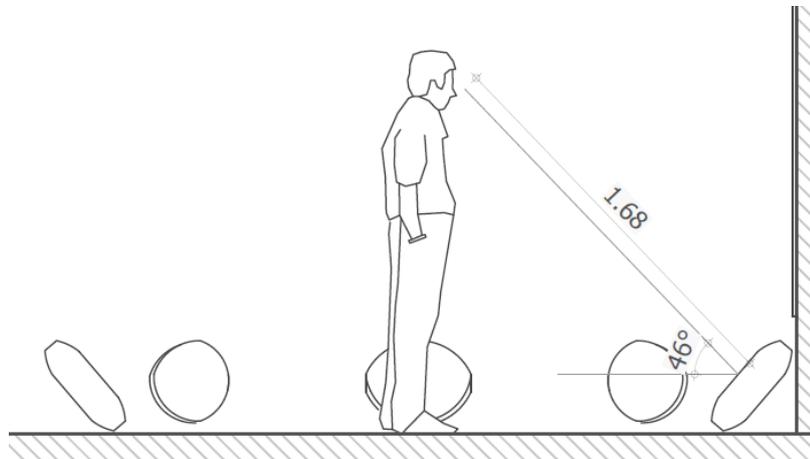


FIGURE 4.3 – Coupe de la localisation des ventilateurs dans la salle d'expérimentation.

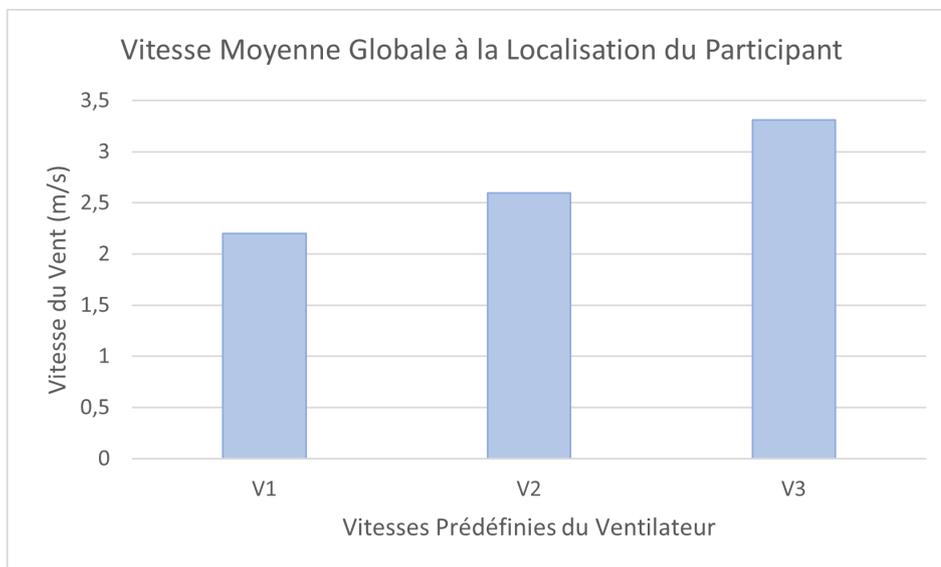


FIGURE 4.4 – Vitesses moyennes globales du ventilateur *ProBreeze 20''* à la localisation du participant.

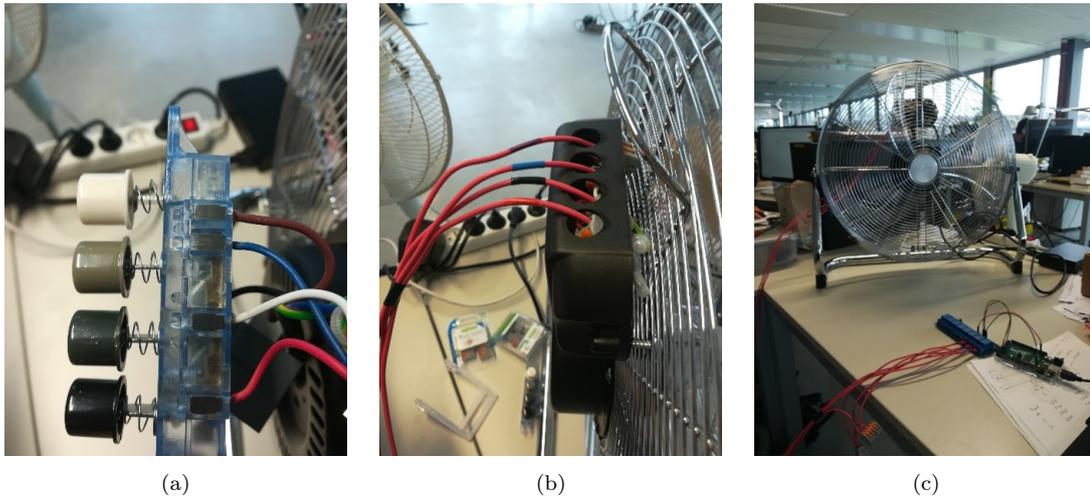


FIGURE 4.5 – (a) Boîtier de boutons du ventilateur avant modification, (b) modification du réglage du ventilateur et (c) connexion au module relais et la carte *Velleman-VMA101*.

4.5.2 Contrôle numérique des ventilateurs

Pour intégrer la restitution tactile du vent dans le dispositif immersif, nous avons mis en œuvre une communication entre la scène virtuelle *Unity3D* et les ventilateurs grâce à une carte *Velleman-VMA101* (qui est basée sur un *ARDUINO-Mega2560*) et un module relais. Ce dernier fonctionne comme un intermédiaire entre la carte et les ventilateurs. Il permet le passage du courant électrique vers les ventilateurs en fonction du signal provenant du micro-contrôleur. Ce signal est produit dans *Unity3D* en définissant à quels moments les ventilateurs doivent s’allumer et à quelle vitesse. Nous avons modifié le boîtier des boutons de contrôle de vitesses de chaque ventilateur afin de pouvoir les contrôler numériquement (voir la Figure 4.5). Nous avons utilisé trois relais pour chaque ventilateur. Cette installation est détaillée dans l’*InfoBox* 4.1.

4.6 Design des expériences

Nous pensons que les informations quantitatives relatives au vent qui sont données dans les étapes de communication des projets architecturaux et urbains ne permettent pas de saisir complètement le phénomène. Par exemple, si nous transmettons une image du comportement du vent dans un espace public, qui exprime par une échelle des couleurs les différentes vitesses produites, les personnes pourront connaître la vitesse approximative du vent et identifier dans quelles zones il y a de plus grandes vitesses. Néanmoins, la

InfoBox 4.1 – Information de la connexion des relais.

Chaque ventilateur était branché directement à la prise électrique. Le neutre et la terre étaient branchés directement sur le moteur du ventilateur, tandis que la phase était branchée sur les boutons de fonctionnement. Chaque relais possède trois entrées : (I) le contact normalement ouvert (c'est-à-dire le contact qui est lié au contact commun si le relais est désactivé) (II) le contact commun et (III) le contact normalement fermé (le contact qui est lié au contact commun au moment d'activer le relais) (voir la Figure 4.6). Nous avons connecté la phase au premier relais avec un fil (noir) dans le contact (II). Ensuite, le contact (III) a été connecté au contact (II) du deuxième relais. Le contact (I) de celui-ci était connecté au fil correspondant à la première vitesse du ventilateur (bleu), tandis que le contact (III) a été connecté au contact (II) du troisième relais. Le contact (I) de ce relais a été connecté au fil de la deuxième vitesse (fil marron) et le contact (III) à la troisième vitesse (fil rouge) (voir la Figure 4.7). Notons qu'il n'y avait rien de connecté au contact (I) du premier relais. De cette façon, au moment d'allumer le premier relais, le courant était transmis au deuxième et activait la première vitesse du ventilateur ; en allumant le deuxième on activait la deuxième vitesse et en allumant le troisième on activait la troisième vitesse.

Cette méthode a été répétée pour chaque ventilateur (voir la Figure 4.8). Le module relais a été alimenté par un bloc d'alimentation externe (5V/DC - 2000mA).



FIGURE 4.6 – Schéma conceptuel du fonctionnement du relais. (I) Contact normalement ouvert (contact lié au contact commun si le relais est désactivé), (II) contact commun (II) contact normalement fermé (contact lié au contact commun si le relais est activé).

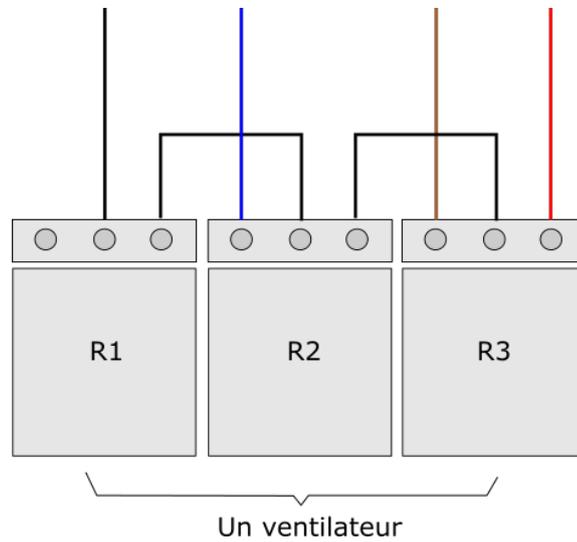


FIGURE 4.7 – Schéma de connections de trois relais pour le fonctionnement d'un ventilateur. Le courant arrive par le fil noir et il est dirigé à travers les relais pour activer la première vitesse (fil bleu), la deuxième (fil marron) et la troisième (fil rouge).

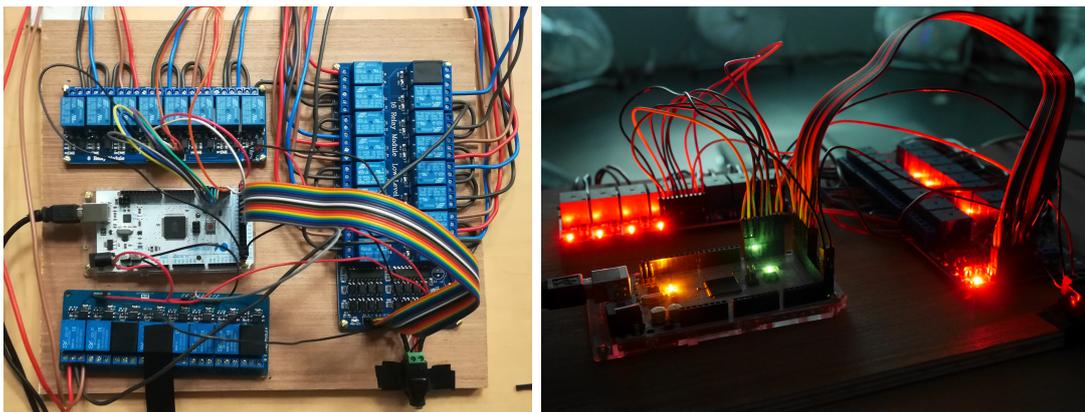


FIGURE 4.8 – Module relais et carte *Velleman-VMA101* connectés aux ventilateurs.

valeur, qu'elle soit 3, 5 ou $10m/s$, ne donne pas une idée précise du comportement dans la réalité, sauf pour les utilisateurs très familiarisés avec ces données. Si nous transposons cet exemple à une simulation numérique de l'éclairage, nous pouvons retrouver les mêmes éléments. Cela veut dire qu'une image résultant d'une simulation, avec une échelle de couleurs, permet de savoir à quel endroit il y a plus ou moins de lumière. Néanmoins, que la valeur soit 100, 500 ou $10.000lx$ sur une surface ne donne pas d'indication sur la perception du phénomène réel, notamment sur le fait qu'il est agréable ou désagréable. Dans le cas de l'éclairage, il existe des représentations sous la forme d'images de synthèse photoréalistes qui simulent le comportement de la lumière dans la réalité et permettent ainsi de mieux comprendre les situations et de les éprouver partiellement.

Ceci est un exemple de deux types de représentations (quantitative et qualitative) du même phénomène physique d'ambiance, la lumière. Nous souhaitons développer un système analogue pour le vent, afin d'exprimer les propriétés sensibles du phénomène, en plus de transmettre les données quantitatives dans les représentations du projet. C'est pourquoi nous avons expérimenté des représentations suggestives du vent trouvées dans l'état de l'art, afin de savoir dans quelle mesure elles peuvent faire comprendre les effets de la vitesse et de la direction du vent dans l'espace.

Nous avons conçu deux expériences avec un design *within-subjects* (A. FIELD et HOLE, 2003) pour évaluer toutes les variables sur l'ensemble des participants de chaque expérience. Elles sont détaillées dans les deux chapitres suivants.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE : PERCEPTION D'UNE REPRÉSENTATION MULTISENSORIELLE DU VENT EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Sommaire

5.1	Objectif	111
5.2	Scène Virtuelle	111
5.2.1	Restitution tactile et sonore	114
5.2.2	Représentation visuelle du flux du vent	115
5.3	Conditions expérimentales	117
5.4	Hypothèses	118
5.5	Procédure	120
5.6	Résultats	121
5.6.1	Analyses statistiques	122
5.6.2	Direction du vent	122
5.6.3	Force du vent	123
5.6.4	Sentiment de présence	124
5.7	Discussion	125
5.8	Limites et perspectives	126
5.9	Conclusion	128

5.1 Objectif

Dans cette première expérience, notre objectif a été d’analyser les effets de trois représentations différentes du vent en termes de perception de ses propriétés et du sentiment de présence dans une scène en réalité virtuelle. Nous nous sommes concentrés sur les représentations suivantes : (I) la représentation audiovisuelle des effets mécaniques du vent sur les éléments du contexte, (II) la visualisation du flux du vent et (III) la restitution tactile du vent à l’aide de ventilateurs. Pour l’expérience, nous présentons aux participants (I), puis (I)+(II) suivi par (I)+(III), et finalement (I)+(II)+(III).

5.2 Scène Virtuelle

Le prototype virtuel est basé sur les résultats CFD obtenus par Houda Belgacem¹ (BELGACEM, 2019). Ces simulations correspondent à la portion sud-est du quartier de la Porte Dauphine à Paris (voir la Figure 5.1a), situé au nord-ouest du 16ème arrondissement.

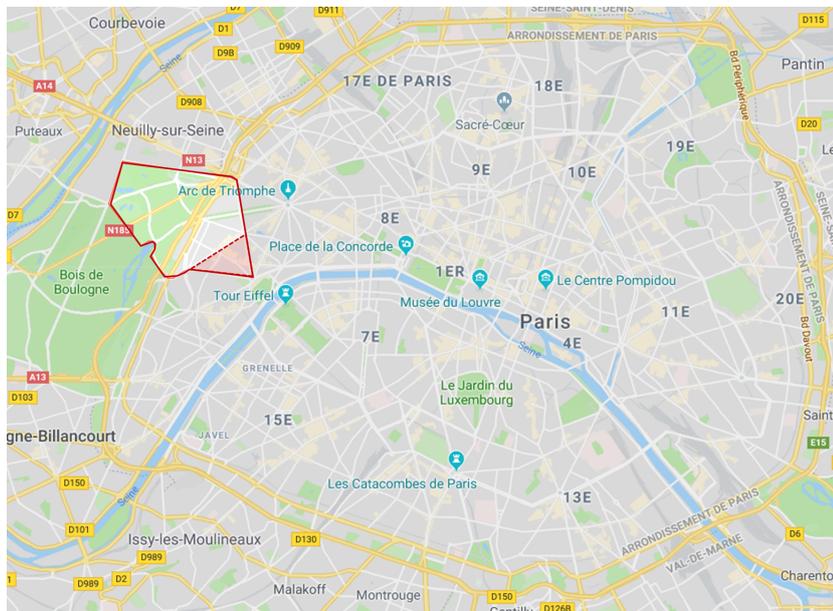
La zone choisie pour l’analyse aéraulique est délimitée par l’avenue Victor Hugo (nord) l’avenue Raymond Poincaré (est) et l’avenue Georges Mandel (sud) (voir la Figure 5.1b). Elle contient la place de Mexico dans son cœur.

Pour permettre les calculs de simulations aérauliques, la morphologie des bâtiments de la maquette numérique a été simplifiée, notamment les hauteurs des bâtiments (voir la Figure 5.3). Les bâtiments ont été groupés par blocs et la valeur moyenne des hauteurs de chaque bloc a défini la hauteur résultante.

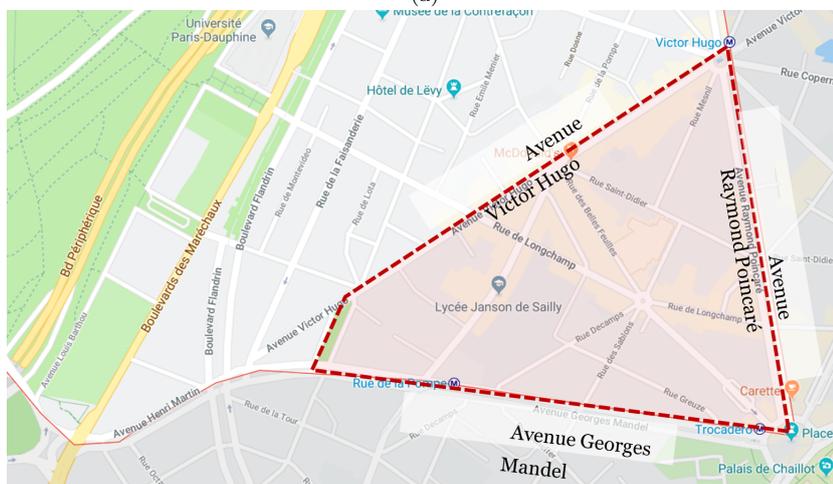
Bien que les résultats des simulations aérauliques correspondent à la maquette simplifiée (voir la Figure 5.3), nous avons décidé d’utiliser la maquette originelle avant simplification (voir la Figure 5.2) pour notre prototype virtuel. Comme on peut le constater dans les images, le fait de différencier la volumétrie des bâtiments, tant dans le plan horizontal que vertical, favorise la compréhension de la proportion de la rue par rapport à l’échelle humaine. De plus, le profil résultant des bâtiments aide à briser la monotonie de la scène, tant au niveau de la vue du ciel que des projections des ombres dans la rue. En outre, nous avons détaillé le modèle 3D avec la forme des toitures, les portes et fenêtres, et nous y avons ajouté des arbres (voir la Figure 5.8).

Nous précisons que nous ne cherchons pas une précision en termes de rendu des propriétés du vent, mais une suggestion de leurs variations.

1. ex-doctorante du laboratoire AAU



(a)



(b)

FIGURE 5.1 – (a) Quartier de la Porte Dauphine et (b) délimitation de la zone simulée (<https://maps.google.fr>).

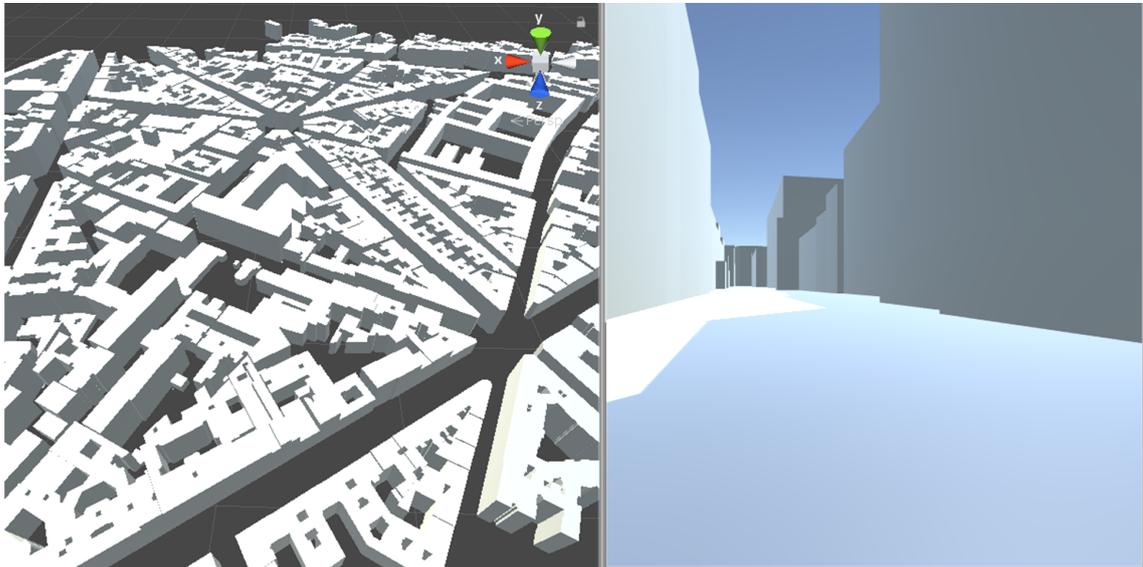


FIGURE 5.2 – Maquette numérique avant la simplification. Perspective surplombante et perspective d'un point de vue immergé.

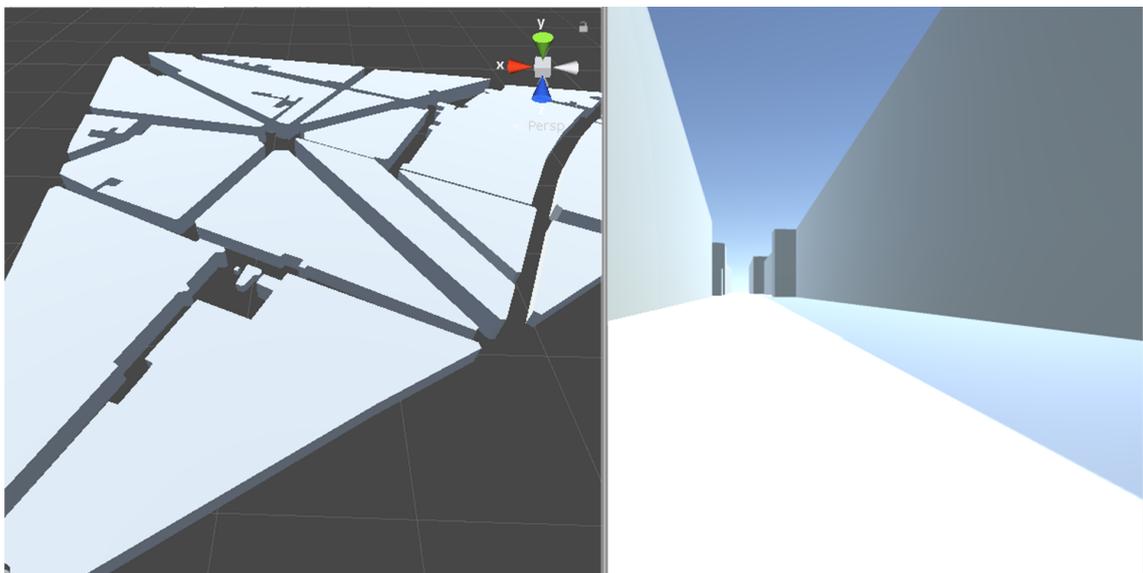


FIGURE 5.3 – Maquette numérique après la simplification (utilisée pour le calcul aérodynamique). Perspective surplombante et perspective du point de vue du piéton.

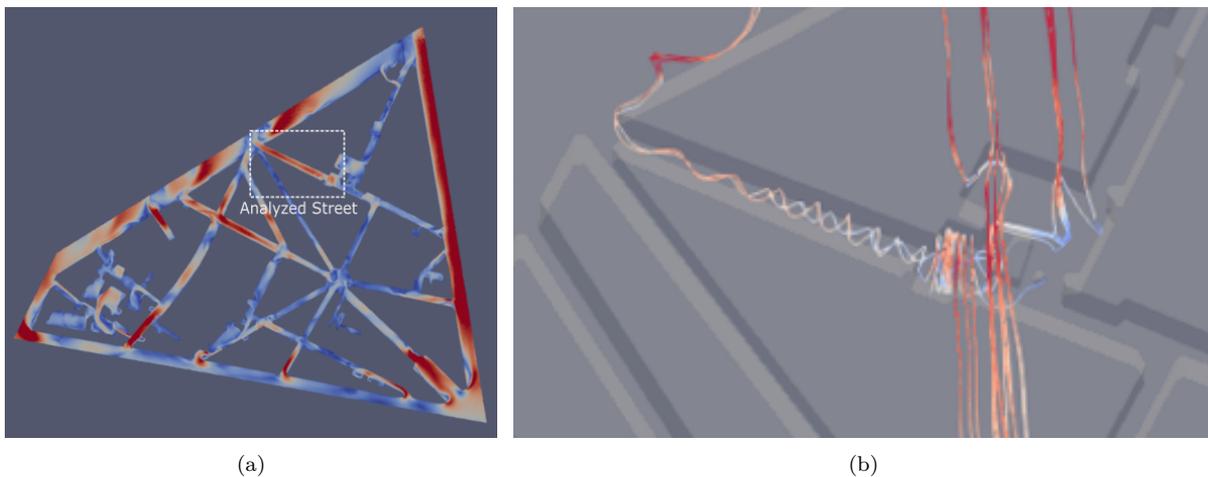


FIGURE 5.4 – Visualisation des résultats CFD : (a) Vitesse du vent en coupe horizontale. (b) *Streamlines* de la vitesse du vent dans la rue d’intérêt de la maquette 3D (GIRALDO et al., 2020).

L’ensemble de l’information a été traité dans le logiciel *ParaView* où nous avons généré deux types différents de visualisation : (I) une coupe horizontale située à une hauteur de 1,5m contenant la direction et la force du vent (voir la Figure 5.4a), qui a été utilisée pour produire la restitution tactile et la spatialisation du son (cf. sous-section 5.2.1) ; et (II) la disposition des *streamlines* tout au long de la rue d’intérêt, contenant les mêmes propriétés afin de produire la visualisation du flux de vent dans la scène virtuelle (voir la Figure 5.4b) (cf. sous-section 5.2.2).

5.2.1 Restitution tactile et sonore

Les données de la coupe horizontale ont été tracées dans la scène virtuelle. Le résultat a été un champ vectoriel tracé tout au long de la rue étudiée (voir la Figure 5.5) qui n’a pas été montré aux participants. Afin d’identifier l’effet du vent à la position de l’avatar virtuel, nous avons créé un octogone autour de celui-ci. Chacun de ses côtés correspondait à la position d’un ventilateur dans la salle d’expérimentation.

Tous les vecteurs qui traversaient l’un des côtés de l’octogone, de l’extérieur vers l’intérieur (voir la Figure 5.6a) ont été groupés afin de créer un vecteur moyen par côté. Chacun de ces vecteurs moyens a été projeté orthogonalement sur l’axe du ventilateur pour calculer la contribution de chacun des ventilateurs (voir la Figure 5.6b). Les ventilateurs ne comptent que quatre vitesses, de 0 (arrêt) à la vitesse maximale 3. Suite à une calibration du dispositif, nous avons attribué la vitesse maximale de la simulation à celle

des ventilateurs. Cette vitesse correspond à trois ventilateurs allumés en même temps à la troisième vitesse. Ensuite, nous avons réalisé une interpolation linéaire pour quantifier l'ensemble des vitesses de 0 à max sur les 4 niveaux possibles. Finalement, les ventilateurs ont été déclenchés grâce à la carte *Velleman-VMA101* en fonction de la quantification calculée.

L'octogone se déplaçait avec l'avatar virtuel et permettait donc d'identifier le comportement du vent tout au long de la rue. Néanmoins, il existe une latence entre le moment où le ventilateur est allumé et celui où le participant ressent le vent. Nous avons donc décidé de prédéfinir les parcours de l'expérience (voir la section 5.5). Cela nous a permis d'anticiper la latence et de relier le vent reçu par les participants avec le vent résultant dans la scène virtuelle.

Pour le rendu sonore, nous nous sommes aussi basés sur l'octogone. Nous avons placé une source sonore (enregistrement du son du vent) autour de l'avatar virtuel qui se déplaçait en fonction des résultats des projections des vecteurs moyens pour suggérer la direction du vent. En ce qui concerne la force du vent, nous nous sommes servis des valeurs de vitesse des vecteurs moyens sur l'octogone afin de définir le volume de reproduction du son du vent. La vitesse maximale de la simulation correspondait à 100% de ce volume.

Une deuxième source sonore était placée dans les arbres, qui suggérait tant le mouvement des feuilles que la présence des oiseaux dans l'environnement virtuel. Ces sons changeaient d'intensité en fonction de la proximité de l'avatar virtuel. L'ensemble des enregistrements ont été récupérés depuis le site web <https://soundbible.com>.

5.2.2 Représentation visuelle du flux du vent

Nous nous sommes posés la question du type de représentation visuelle de l'écoulement du vent à utiliser pour notre évaluation. D'après les moyens d'expression utilisés dans la littérature, tant les *streamlines* que la représentation par surfaces offrent des avantages pour les modèles tridimensionnels d'un point de vue surplombant. Nous avons dessiné ces types de représentation d'un point de vue immergé (voir la Figure 5.7). Cela nous a permis de conclure que la lecture des *streamlines* pourrait être plus facile que celle des surfaces de ce point de vue, à cause des occlusions et du manque de profondeur produit à la fois dans la représentation du vent et dans le contexte du modèle 3D.

Les vecteurs qui structurent les *streamlines* utilisées dans notre prototype virtuel provenaient des résultats des simulations CFD. Elles ont été générées dans le logiciel *Paraview*

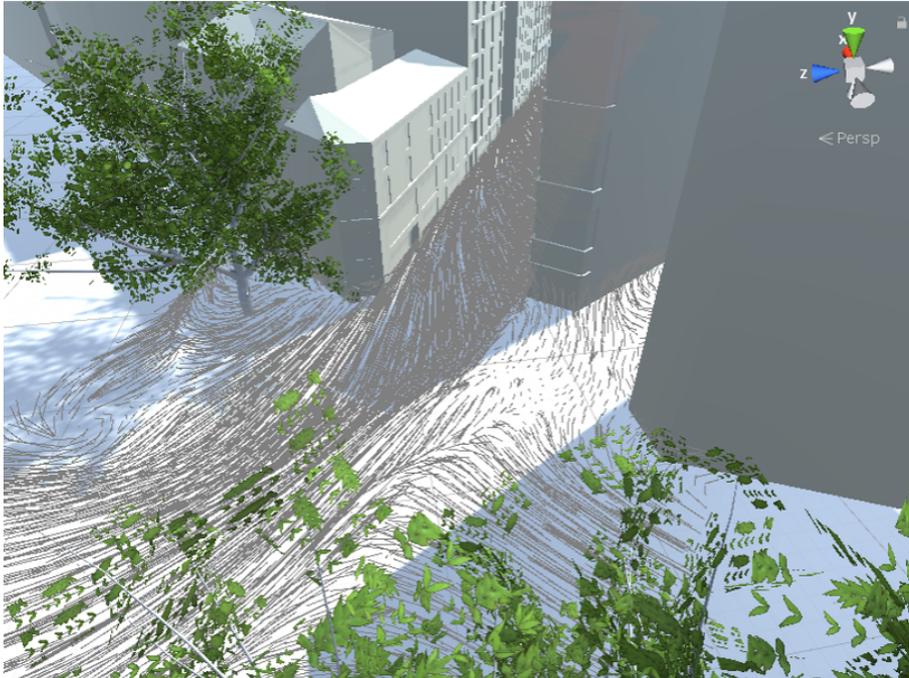


FIGURE 5.5 – Champ de vecteurs tracé sur la rue virtuelle étudiée.

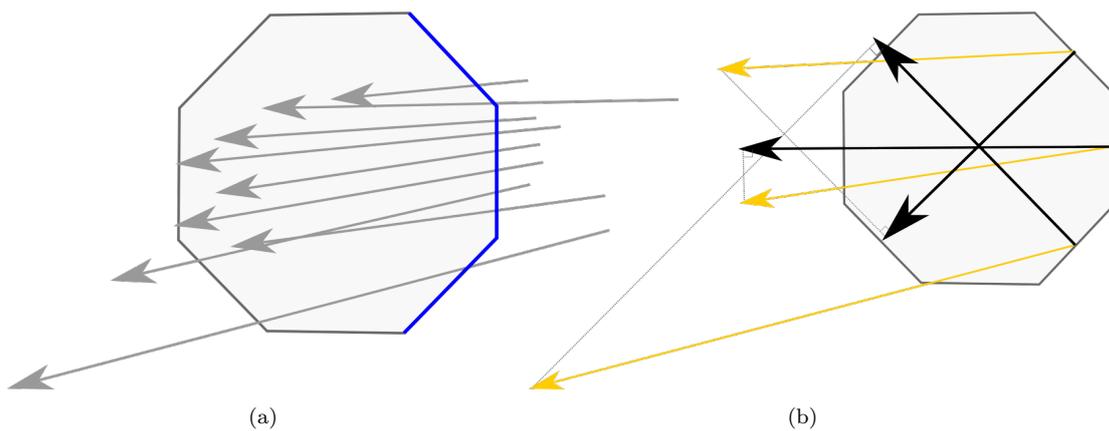


FIGURE 5.6 – Représentation schématique de l'octogone virtuel (GIRALDO et al., 2020). (a) Identification des vecteurs traversant l'un des côtés de l'extérieur vers l'intérieur. (b) Vecteur moyen (en jaune) de la vitesse et direction du vent projeté sur l'axe du ventilateur (flèches noires).

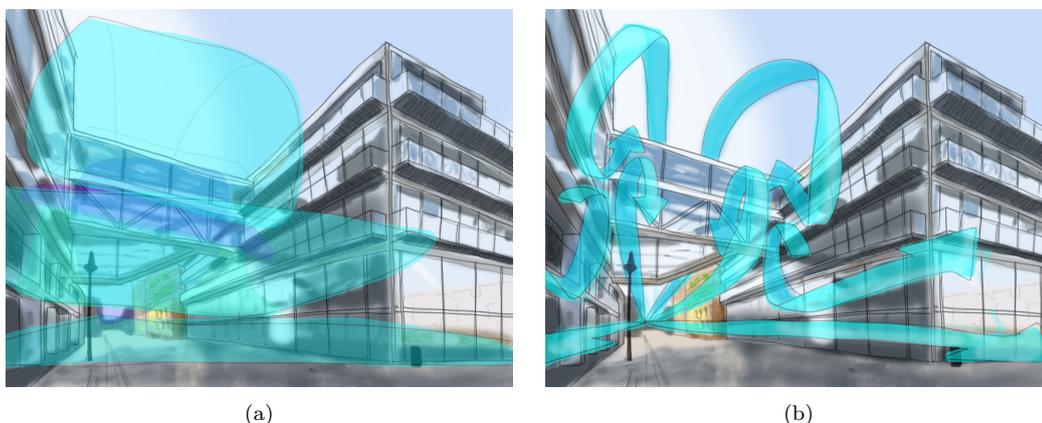


FIGURE 5.7 – Esquisse d’une visualisation du vent d’un point de vue immergé. (a) Visualisation du flux du vent à l’aide des surfaces et (b) à l’aide de *streamlines* (GIRALDO et al., 2020).

(V5.5.0, fonction *Stream Tracer*, avec les paramètres suivants : *vectors menu* défini comme *velocity*, *Integration direction* : *Forward*, *Integrator type* : *Runge-Kutta 4-5*, *Seed Type* : *High resolution line source*, *Resolution* : *20*).

L’information a été exportée dans un fichier *CSV* qui a été ensuite importé dans le contexte d’*Unity3D*. Le fichier contenait l’information de la direction et de la force du vent pour chacun des points qui constituaient la ligne. Nous avons utilisé ces données pour créer des chemins de référence dans l’environnement virtuel. Nous avons ensuite créé une animation d’un objet qui se déplaçait tout au long de la ligne du chemin et qui laissait une trace des particules. Cela nous a permis de rendre visible l’écoulement dans la rue virtuelle afin de suggérer la présence du vent et son interaction avec l’environnement bâti (voir la Figure 5.8b). Dans l’expérience l’animation des *streamlines* a été présentée en boucle qui recommençait une fois que toutes les lignes avaient atteint la fin de leur chemin.

5.3 Conditions expérimentales

La première expérience est basée sur un design *within-subjects*, avec 37 participants impliqués (17 femmes et 20 hommes), âgés de 22 à 61 ans (moyenne=35, $\sigma=9,6$). L’expérience comporte une variable indépendante, le type de représentation du vent, avec quatre différents niveaux qui ont été présentés aux participants dans l’ordre suivant :

- **R** : Scène de référence composée d’une représentation audiovisuelle des effets méca-



FIGURE 5.8 – (a) Scène de référence, premier parcours présenté aux participants. (b) Participant dans la scène virtuelle avec la représentation visuelle du flux du vent.

niques du vent sur les éléments du contexte. La direction et la force du vent ont été données par le son du vent spatialisé. La présence du vent était également suggérée par le mouvement des feuilles des arbres et des nuages (voir la Figure 5.8a) ;

- **V** : Scène de référence (R) + la représentation visuelle du flux du vent, tel qu’on le trouve dans les représentations utilisées en architecture (voir la Figure 5.8b) ;
- **T** : Scène de référence (R) + restitution tactile du vent avec des ventilateurs commandés numériquement ;
- **V+T** : Scène de référence (R) + représentation visuelle du flux du vent (V) + restitution tactile (T).

Les trois variables dépendantes ont été la perception des propriétés du vent (**D1** : direction et **D2** : force), et **D3** : le sentiment de présence dans la scène de réalité virtuelle.

Une vidéo des conditions expérimentales est consultable sur le lien suivant <https://youtu.be/eMKBUAsbalM>. La condition R se trouve dans la minute 0:28, la condition V dans la 0:41 et la condition V+T dans la 0:54.

5.4 Hypothèses

En nous basant sur notre revue de littérature (présentée dans le chapitre 2 et le chapitre 3), et nos conditions expérimentales, nous avons proposé les hypothèses suivantes :

- **H1** : Nous considérons que la condition **V** sera plus adéquate pour la compréhension de la direction du vent par rapport à **T**. Nous partons du fait de la prédominance du sens de la vue, tant dans le monde réel que dans les environnements virtuels. Nous captons plus de données par ce sens et à une plus grande vitesse, comparé aux autres sens (HALL, 1969). C'est pourquoi nous considérons que la visualisation de l'écoulement du vent pourrait faciliter la compréhension de l'information en termes de direction du vent ;
- **H2** : Partant de l'hypothèse que H1 est correcte, nous pensons que **V+T** sera meilleure que **V** et **T** pour comprendre la direction du vent dans le dispositif. Partant du même principe que pour l'hypothèse précédente, nous considérons que le fait d'ajouter la restitution tactile à la visualisation du flux du vent devrait rendre plus compréhensible le message envoyé ;
- **H3** : Nous pensons que **T** sera plus approprié pour comprendre la force du vent comparé à **V**. Nous considérons que la pression du vent sur nos capteurs corporels peut donner une idée plus claire des variations de la force du vent que la visualisation du flux du vent à l'aide des *streamlines* ;
- **H4** : **V+T** permettra une plus grande compréhension de la force du vent que **V** et **T**. Comme pour H2, nous pensons que la congruence des sens du toucher et de la vue, aidera à mieux comprendre les propriétés du vent ;
- **H5** : La condition **T** sera plus adéquate pour augmenter le sentiment de présence dans la scène de réalité virtuelle par rapport à **V**. Les études précédentes (LEHMANN et al., 2009 ; MOON et KIM, 2004 ; RIETZLER et al., 2017 ; VERLINDEN et al., 2013) ont montré que les effets de la restitution tactile en RV augmentent le sentiment de présence comparé à une représentation uniquement audiovisuelle. Nous considérons donc que la visualisation du flux du vent utilisé dans l'étude sera cohérente avec ces travaux ;
- **H6** : Nous considérons que **T** augmentera le sentiment de présence dans la scène virtuelle par rapport à **V+T**. Dans ce cas, nous ne pensons pas que l'addition des deux variables donnera un meilleur résultat car, la visualisation du flux du vent ne correspond pas à la réalité.

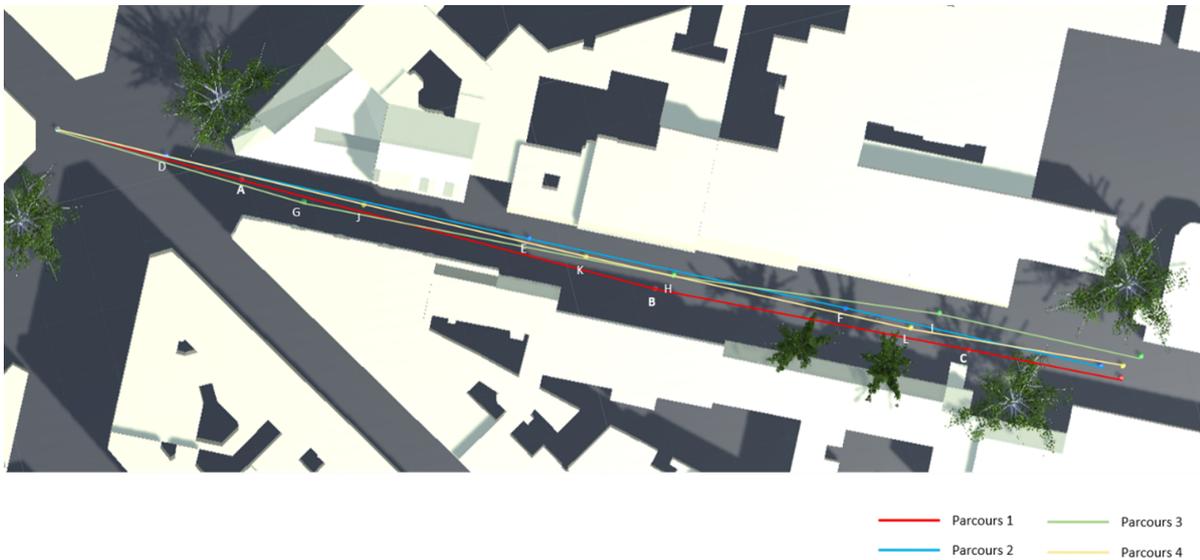


FIGURE 5.9 – Parcours prédéfinis pour évaluer les conditions expérimentales.

5.5 Procédure

Chaque participant s’est rendu dans la salle de réalité virtuelle où la procédure a été expliquée. Il ou elle devait faire quatre parcours virtuels prédéfinis (à cause de la latence dans la perception du vent dû au temps d’allumage des ventilateurs et au déplacement du flux d’air) dans la même rue (voir la Figure 5.9). Chaque parcours était caractérisé par un type de représentation et a été présenté aux participants selon l’ordre donné ci-dessus. Les participants suivaient le parcours prédéfini jusqu’à un point d’évaluation. Chaque parcours avait trois points d’évaluation. Arrivé à l’un de ces points, le participant avait 15 secondes pour évaluer la force et la direction du vent perçu. Ensuite il continuait son parcours jusqu’au point suivant. Les points d’arrêt étaient différents pour chaque parcours, mais dans la même zone afin de garder des conditions urbaines comparables. Nous avons fait ce choix pour éviter un biais d’habitude dans la rue. Avant de commencer, les participants ont reçu une tablette tactile, les écouteurs et nous leur avons demandé leur taille afin d’ajuster le point de vue de la caméra. Ensuite, ils ont été placés devant l’écran au centre du groupe de ventilateurs, où une valeur de référence (correspondant aux trois ventilateurs de face à la vitesse maximale) a été donnée afin d’identifier la valeur maximale de la force, au niveau tactile et sonore (rendu du son maximal dans les écouteurs).

La tablette disposait d’une application qui indiquait le numéro de l’arrêt à évaluer et permettait aux participants de spécifier la direction du vent dans un cercle et la force

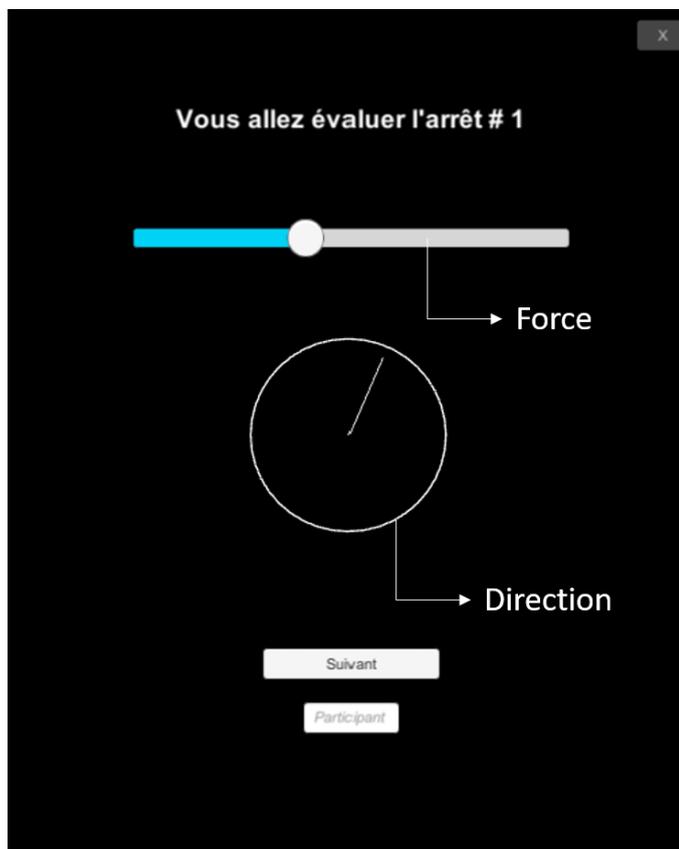


FIGURE 5.10 – Écran d'évaluation de la force et de la direction du vent.

du vent dans un curseur de 0 (correspondant à l'absence de vent) à 10 (correspondant à la valeur de référence maximale donnée en restitution audio et tactile aux sujets avant l'expérience) (Voir la Figure 5.10).

A la fin de chaque parcours, les participants devaient évaluer leur sentiment de présence dans la scène virtuelle avec un questionnaire Slater-Usoh-Steed (SUS) (SLATER et al., 1998). Puis ils continuaient l'expérience avec un autre type de représentation.

5.6 Résultats

Dans cette section, nous présentons les analyses statistiques descriptives et inférentielles de la perception des propriétés du vent (direction et force), et du sentiment de présence dans la scène RV.

5.6.1 Analyses statistiques

L’analyse a pris en compte la différence entre les paramètres simulés initiaux du vent dans la scène (rendus dans diverses conditions expérimentales) et les réponses de l’utilisateur pour les propriétés du vent et le sentiment de présence.

Une transformation en racine carrée a été appliquée aux données afin de limiter l’amplitude de l’échelle des valeurs des réponses des participants. Cela a été réalisé en vue de gérer les valeurs aberrantes des données et de normaliser les valeurs absolues² des écarts des réponses. Les valeurs obtenues, en termes des propriétés du vent (direction et force) et de présence, ont été analysées à l’aide d’un modèle linéaire multi-niveaux, qui est une régression qui tient compte de la dépendance des données (A. P. FIELD et al., 2012). Le modèle comprend la variable à expliquer (différence de direction, différence de force et présence), la variable explicative (le type de représentation) et le facteur participant (le fait que les données proviennent des mêmes personnes) comme effet aléatoire. L’hypothèse de normalité a été testée avec le test de *Shapiro-Wilk* au niveau 5%. Le test *post-hoc* de *Tukey* a été réalisé pour comparer toutes les conditions de représentation de la variable catégorielle. L’analyse statistique a été réalisée à l’aide du logiciel R, avec la fonction *lme* du paquet *nlme*. La fonction *glht* (paquet *multcomp*) a été utilisée pour les comparaisons par paires et la fonction *shapiro.test* (paquet *stats*) pour l’hypothèse de normalité.

5.6.2 Direction du vent

La condition expérimentale a eu un effet significatif sur l’estimation de la direction du vent, $\chi^2(3) = 66.87, p < 0.0001$. Le contraste orthogonal a révélé que l’erreur de direction (différence entre la réponse attendue et la valeur donnée par les participants) était significativement réduite pour **T** par rapport à **R**, $b = 3,05, t(108) = 8,22, p < 0,001$, et par rapport à **V**, $b = 1,67, t(108) = 4,52, p < 0,001$. Il n’y a pas eu de différence statistiquement significative dans l’erreur de la direction du vent entre **T** et **V+T**, $b = 0,34, t(108) = 0,93, p = 0,35$. Afin de comparer les différences significatives par paires, nous avons effectué un test *post-hoc* comme indiqué ci-dessous (voir la Figure 5.11) :

- Par rapport à **R**, l’erreur de direction a été significativement réduite par **T** ($p < 0,001$), **V+T** ($p < 0,001$) et **V** ($p = 0,001$) ;

2. Nous avons utilisé les valeurs absolues pour l’analyse afin de nous concentrer sur l’écart à la valeur réelle des réponses quel que soit le côté dont elles proviennent.

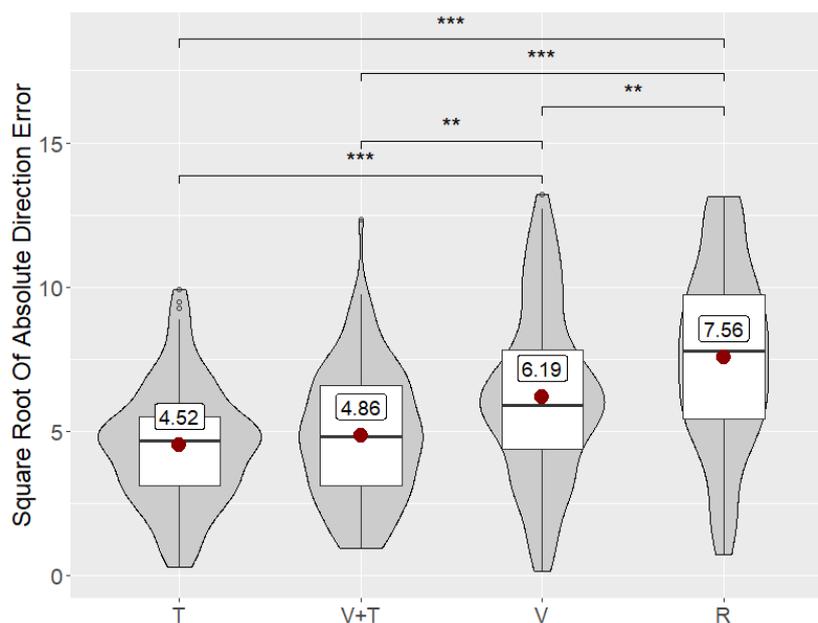


FIGURE 5.11 – *Box plot* et *violin plot* de la racine carrée de l'erreur d'estimation de la direction du vent à travers les quatre différentes représentations. Le point rouge représente la valeur moyenne. Les lignes horizontales représentent les quartiles. La ligne horizontale en gras est la médiane. Le *violin plot* montre la distribution des réponses pour chaque condition. Pour chaque graphique, les étoiles présentent le niveau de signification (* = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$).

- par rapport à **V**, l'erreur de direction a été significativement réduite par **T** ($p < 0,001$) et **V+T** ($p = 0,0017$);
- il n'y a pas eu de différence statistiquement significative dans l'erreur de la direction du vent entre **V+T** et **T**. ($p = 0,78$).

5.6.3 Force du vent

Les conditions expérimentales ont eu un effet significatif sur l'estimation de la force du vent, $\chi^2(3) = 13,54, p = 0,0036$. Le contraste orthogonal a révélé que l'erreur de force (différence entre la réponse attendue et la valeur donnée par les participants) était significativement réduite pour **T** par rapport à **R**, $b = 0,18, t(108) = 2,64, p = 0,0094$. Il n'y a pas eu de différence statistiquement significative dans l'erreur de la force de **T** ni par rapport à **V**, $b = 0,14, t(108) = 1,99, p = 0,05$, ni par rapport à **V+T**, $b = -0,039, t(108) = -0,56, p = 0,57$. Afin de comparer les différences significatives par paires, nous

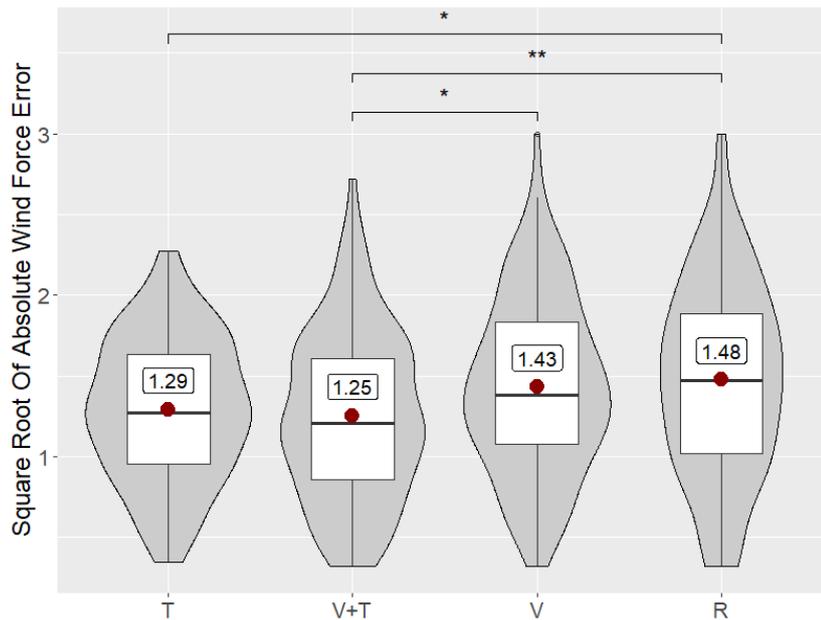


FIGURE 5.12 – *Box plot* et *violin plot* de la racine carrée de l’erreur absolue de la force du vent à travers les quatre différentes représentations.

avons produit un test *post-hoc* comme indiqué ci-dessous (voir la Figure 5.12) :

- Par rapport à **R**, l’erreur de force a été significativement réduite par **T** ($p = 0,039$) et par **V+T** ($p = 0,0068$);
- par rapport à **V**, l’erreur de force a été significativement réduite par **V+T** ($p = 0,049$); l’erreur de force du vent n’a pas été significativement différente, ni avec **R** ($p = 0,91$) ni avec **T** ($p = 0,18$);
- il n’y a pas eu de différence statistiquement significative dans l’erreur de force entre **T** et **V+T** ($p = 0,94$).

5.6.4 Sentiment de présence

Les conditions expérimentales ont également eu un effet significatif sur l’estimation du sentiment de présence, $\chi^2(3) = 53,543, p < 0,001$. Le contraste orthogonal a révélé que le sentiment de présence a été significativement accru dans **T** par rapport à **R**, $b = -0,17, t(108) = -5,60, p < 0,001$, à **V**, $b = -0,24, t(108) = -7,66, p < 0,001$ et à **V+T**, $b = -0,08, t(108) = -2,78, p = 0,006$. Afin de comparer les différences significatives par paires, nous avons produit un test *post-hoc* comme indiqué ci-dessous (voir la Figure 5.13) :

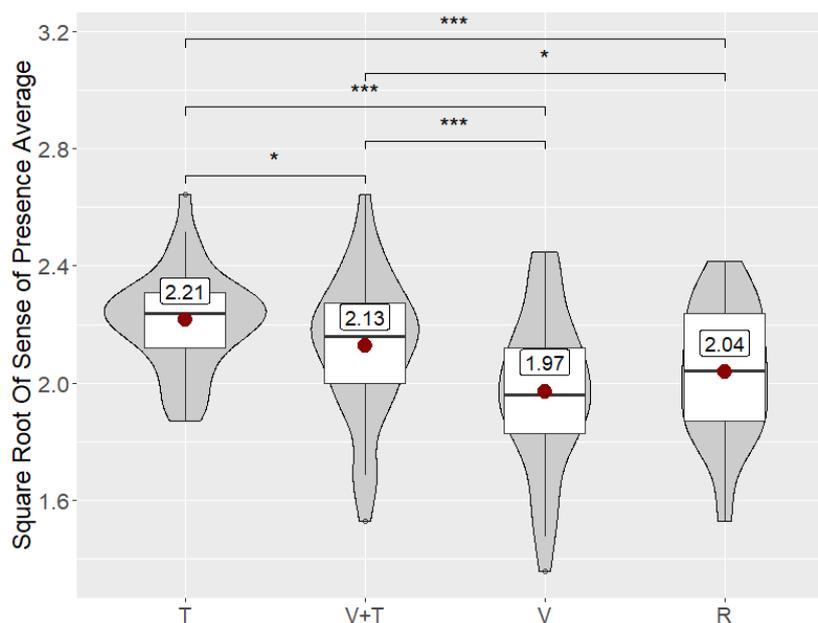


FIGURE 5.13 – *Box plot* et *violin plot* de la racine carrée du sentiment de présence moyen à travers les quatre différentes représentations. Plus la valeur est élevée, plus le sentiment de présence est élevé.

- Le sentiment de présence a été significativement accru par **T** par rapport à **R** ($p < 0,001$), à **V** ($p < 0,001$) et à **V+T** ($p = 0,024$);
- le sentiment de présence a été significativement accru par **V+T** par rapport à **R** ($p = 0,023$) et par rapport à **V** ($p < 0,001$);
- il n’y a pas eu de différence statistiquement significative dans le sentiment de présence entre **V** et **R** ($p = 0,15$).

5.7 Discussion

Les résultats de cette expérience montrent que, selon les conditions et types de représentations utilisées dans notre prototype, la condition **T** a été la plus adaptée en termes de perception pour **D1** (la direction du vent) et c’est aussi celle qui a augmenté le plus **D3** (le sentiment de présence). Concernant **D2** (la force du vent), **V+T** a montré le meilleur résultat.

T permet une meilleure évaluation de la direction du vent, rejetant ainsi l’hypothèse **H1**. Les *streamlines* utilisées dans l’étude pour les conditions **V** et **V+T** sont, selon

LARAMEE et al. (2004), plus adaptées aux visualisations 3D que les visualisations directes (à cause des occlusions, de l’encombrement visuel ou du manque de profondeur). Pourtant, il existe plusieurs façons de comprendre les *streamlines* : on peut soit les considérer comme un tout, indiquant ainsi une direction globale, soit les considérer plus localement comme une sorte de vortex. Cela pourrait expliquer pourquoi, même si **V** était plus précis que **R**, il n’était pas aussi bon que **T**.

Les résultats de **V+T** ne permettent pas d’accepter l’hypothèse **H2**. En ajoutant la restitution tactile du vent aux effets visuels, la perception de sa direction s’est améliorée par rapport à **V**, néanmoins elle n’est pas significativement différente de **T**. Cela montre que, lors de l’évaluation de la direction du vent, l’effet tactile a été dominant par rapport à l’effet visuel, ce qui met en évidence un possible problème au moment de tenter une approche similaire en réalité augmentée si le vent réel ressenti n’est pas cohérent avec la représentation visuelle du phénomène.

Bien que l’estimation moyenne de la force du vent tende à être plus précise pour **T** que pour **V**, l’hypothèse **H3** ne peut être formellement acceptée. Contrairement à **V**, les conditions **T** et **V+T** étaient significativement différentes de **R**. Dans la condition **V+T**, les participants ont eu tendance à être plus précis dans leur perception de la force du vent. Cependant, cette condition n’était pas significativement différente de **T**, ce qui ne permet pas d’accepter l’hypothèse **H4**.

En ce qui concerne le sentiment de présence dans la scène de RV, les résultats montrent que **T** était la condition qui l’augmentait le plus, soutenant ainsi les hypothèses **H5** et **H6**. La condition **V** a diminué le sentiment de présence par rapport à **R**. Cela peut s’expliquer par le fait que nous avons rendu visible quelque chose dans le monde virtuel qui ne l’est pas dans le monde réel. En ajoutant des effets tactiles aux effets visuels (**V+T**), le sentiment de présence était accru par rapport à **R**. Même si **V+T** est inférieur à **T**, cette étude pourrait être élargie avec différents stimuli visuels. Par rapport à la condition **R**, la condition **T** était meilleure, ce qui est cohérent avec des études similaires antérieures (KULKARNI et al., 2012 ; LEHMANN et al., 2009).

5.8 Limites et perspectives

La comparaison des propriétés du vent en ce qui concerne ses effets visuels et tactiles était l’un des principaux objectifs de cette première expérience. Pour ce faire, nous avons utilisé une représentation de *streamlines* qui nous permet de suivre le flux du vent le

long de sa trajectoire. Cette visualisation nous permet donc d'identifier l'interaction entre les formes urbaines et le vent. Cependant, en raison de la nature tridimensionnelle des *streamlines*, il peut être compliqué de comprendre la direction du vent, qui a été évaluée en deux dimensions. Les *streamlines* pourraient donner une meilleure idée de la direction globale du flux, mais il pourraient s'avérer plus difficile d'identifier la direction spécifique du vent à un endroit précis de l'espace, c'est-à-dire le moment exact où la ligne a un impact sur l'utilisateur.

Dans la visualisation traditionnelle, la force du vent est généralement représentée par un dégradé de couleurs dans une image statique. Dans notre prototype, elle est représentée visuellement par la vitesse d'un objet 3D. Cela peut limiter la perception de petits changements de vitesse et pourrait expliquer la similarité entre **R** et **V**. C'est pourquoi nous pensons que l'étude d'autres types d'effets visuels de représentation du vent pourrait être plus appropriée pour des analyses futures.

Certaines limites proviennent également de la représentation et de la mesure des caractéristiques du vent. Nos 8 ventilateurs n'avaient que 4 vitesses possibles chacun créant ainsi, même combinés, un nombre limité de couples possibles de force et de direction du vent. Du côté de la mesure, nous avons utilisé une échelle de 1 à 10 qui n'avait pas d'équivalent physique et qui, par conséquent, ne nous permettait pas de mesurer pleinement et de comparer la vitesse ressentie à la vitesse réelle du vent. Notons que cet effet est présent dans toutes les conditions.

L'estimation des propriétés du vent dans une situation réelle peut s'avérer compliquée sans les outils de mesure nécessaires (les méthodes traditionnelles d'estimation du vent sont basées sur des références, par exemple l'échelle de Beaufort (for MARITIME METEOROLOGY., 1970) décrit les effets mécaniques du vent sur l'environnement).

Enfin, nous aimerions également souligner que la simulation du vent, comme tout résultat d'un calcul CFD, est également très sensible à la taille du maillage et aux données initiales, et qu'elle nécessite un processus de validation par comparaison avec des données réelles. L'objectif de cette expérience était davantage d'évaluer la perception des résultats de la simulation que d'évaluer, à ce stade, une simulation précise d'une rue réelle. Cela constituerait toutefois un sujet intéressant de collaboration entre la simulation et les utilisateurs finaux tels que les architectes. À terme, une visualisation basée sur la RA (réalité augmentée) pourrait également être intéressante pour rendre visibles les résultats d'une simulation CFD sur site.

Une autre limite potentielle de cette expérience est l'utilisation d'un grand écran

unique au lieu d'un HMD. Si le premier a l'avantage de ne pas couvrir le visage pour la stimulation tactile, le second pourrait permettre une meilleure immersion grâce à un champ de vision plus large et en rendant les ventilateurs totalement invisibles. A ce stade, notre étude est basée sur la perception qualitative du vent, nous souhaiterions également évaluer les JNDs (Just Noticeable Differences) atteignables avec notre système, tel que décrit par NAKANO et al. (2014).

5.9 Conclusion

Nous avons présenté dans cette expérience une étude utilisateur qui avait pour objectif de comparer les effets de différents types de représentation du vent sur la perception et la compréhension des propriétés du phénomène, et leur influence sur le sentiment de présence dans une scène virtuelle. L'étude a été menée à bien sous quatre différentes conditions : (R) une représentation audiovisuelle des effets mécaniques du vent sur les éléments du contexte, (V) une visualisation de l'écoulement du vent afin de rendre visible son interaction avec l'environnement bâti, (T) une restitution tactile du vent à l'aide d'un groupe de ventilateurs commandés numériquement et (V+T) qui rassemblait (V) et (T).

Les résultats montrent une meilleure compréhension de la direction et de la force du vent, ainsi qu'une augmentation du sentiment de présence, avec les conditions qui incluaient une restitution tactile du vent. En ce qui concerne la direction du vent, et le sentiment de présence, l'addition de la restitution tactile (à l'aide des ventilateurs) à la scène de référence a été la plus performante. Par rapport à la force du vent, tant les effets tactiles que les effets visuels ont montré une plus grande influence sur les résultats.

Nous avons exploité différents types de représentations du vent provenant des résultats des simulations aérauliques d'un espace urbain, au delà de la visualisation du flux du vent. Nous pensons que ces types de représentations pourraient alimenter le processus de conception dans les différentes étapes du projet architectural et urbain. La restitution tactile du vent évaluée dans cette expérience montre un potentiel pour tenter de simuler le possible comportement du vent d'un espace urbain. Cette étude montre l'intérêt qu'il y aurait à exploiter les dimensions sensibles des phénomènes aérauliques dans les champs de l'architecture et de l'urbanisme en partant des données physiques résultant d'une simulation numérique du vent.

DEUXIÈME EXPÉRIENCE : PERCEPTION DE L'ESTIMATION DE LA FORCE DU VENT PAR RAPPORT À L'ÉCHELLE DE BEAUFORT

Sommaire

6.1	Objectif	131
6.2	Maquette numérique	131
6.3	Conditions expérimentales	131
6.4	Hypothèses	136
6.5	Procédure	137
6.6	Résultats	137
6.6.1	Analyses statistiques	140
6.6.2	Force du vent	141
6.6.3	Direction du vent	143
6.7	Discussion	145
6.8	Limites et perspectives	147
6.9	Conclusion	148

6.1 Objectif

Cette deuxième expérience a eu pour objectif d'évaluer la perception de la force (basée sur l'échelle de Beaufort) et les effets de la direction du vent, sous différentes conditions. L'expérience a impliqué 30 participants (12 femmes et 18 hommes), de 23 à 53 ans (Moyenne=35, $\sigma=8.7$). Cette expérience diffère de la précédente en ce qu'elle met l'accent sur la restitution tactile du vent et sur l'évaluation de la perception de sa force en prenant une référence connue, l'échelle de Beaufort. Elle complète l'expérience précédente sur la question de la direction du vent car nous n'avions pas évalué les perceptions de la force du vent en fonction de sa direction. En effet, lors de notre première expérience nous avons évalué la compréhension de la direction et de la force du vent dans le dispositif, mais nous n'avons pas évalué les effets de cette direction sur la perception de la force du vent. Nous voulons compléter l'expérience pour savoir si certaines directions de vent conduisent à surestimer ou sous-estimer sa force perçue par rapport à sa force réelle.

6.2 Maquette numérique

Pour notre deuxième expérience, nous avons utilisé une maquette numérique (Source : Nantes Métropole (2014)) qui correspond à une partie de la zone nord du quartier Centre-Ville de Nantes (voir la Figure 6.1). Nous avons utilisé cinq rues de cette maquette : (1) Rue Jean Jaurès, (2) Rue de l'industrie, (3) Rue Mercœur, (4) Rue la Fayette et (5) Rue de Budapest (voir la Figure 6.2); dans lesquelles nous avons localisé l'avatar virtuel pour évaluer les conditions de l'expérience (voir la Figure 6.3 et la Figure 6.4).

6.3 Conditions expérimentales

Nous avons utilisé un design *within-subjects* avec trois variables indépendantes :

- **La force du vent**, avec deux niveaux : (I) force maximale (trois ventilateurs allumés à vitesse 3) et (II) force minimale (un ventilateur allumé à vitesse 1) (voir Figure 6.5);
- **la direction du vent**, avec trois niveaux : (I) le vent provenant d'en face, (II) provenant de l'arrière et finalement (III) celui provenant de l'un des côtés (aléatoirement);

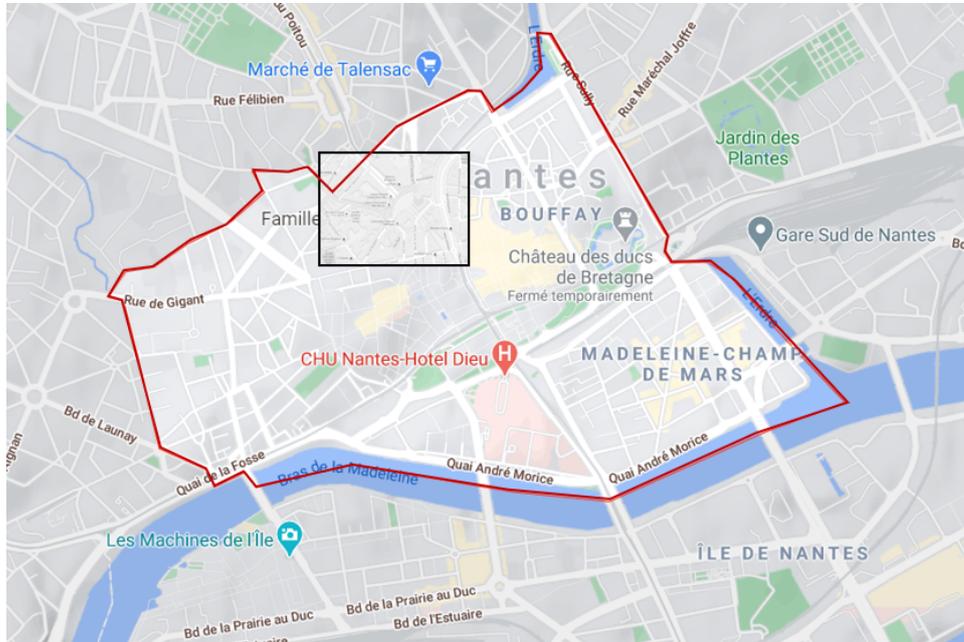


FIGURE 6.1 – Quartier Centre-Ville de Nantes (délimité en rouge) et zone de la maquette numérique utilisée (délimitée en noir). Image de <https://maps.google.fr> modifié.

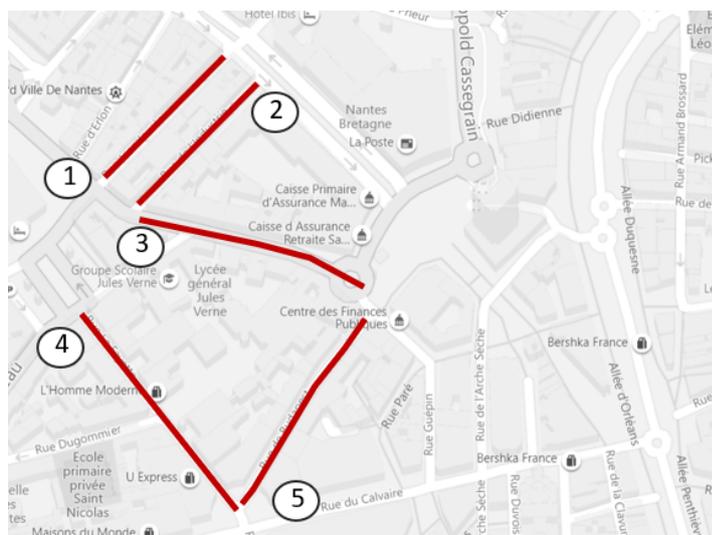


FIGURE 6.2 – Rues utilisées pour les parcours lors de l'évaluation des conditions (<https://www.bing.com/maps>).

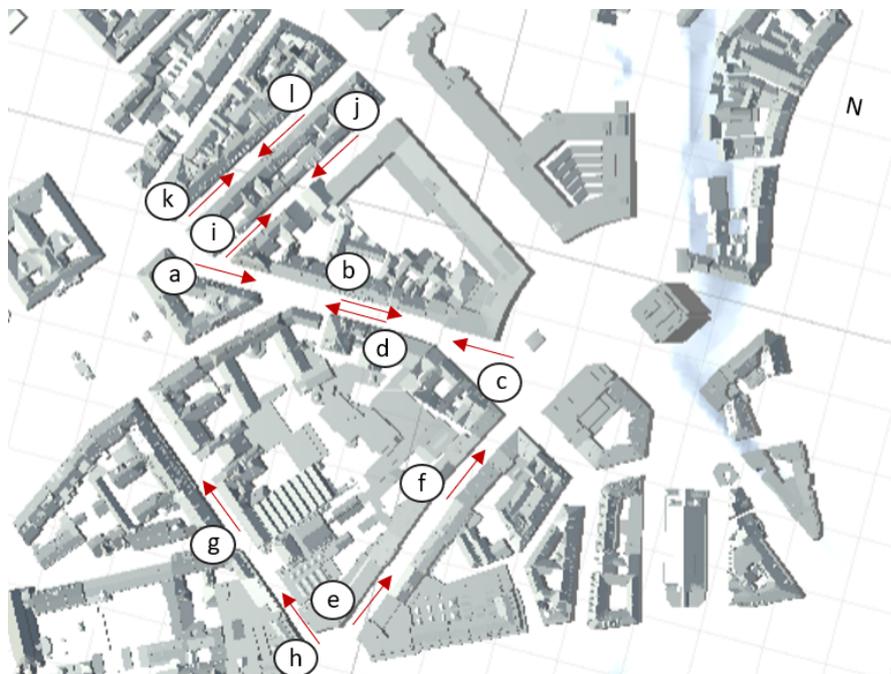


FIGURE 6.3 – Vue surplombante du modèle 3D, avec le début et la direction des différents parcours. Source du modèle 3D : Nantes Métropole (2014).

- **la suggestion visuelle du vent**, avec deux niveaux : (I) avec et (II) sans nuages (voir Figure 6.6). Lorsque les nuages sont présents, ils se déplacent en suivant les deux variables précédentes (force et direction) présentes dans la condition d'évaluation.

Selon ces trois variables, nous avons défini 12 conditions qui ont été présentées deux fois de façon aléatoire aux participants (elles sont compilées dans le Tableau 6.1). La vidéo suivante <https://youtu.be/eMKBUAsbalM> montre l'exemple de l'évaluation d'un parcours par un participant (minute 1:14). Nous précisons que cette vidéo est indicative et que les lumières de la salle étaient éteintes lors de l'évaluation des conditions.

Les participants ont réalisé les 24 évaluations en commençant leurs parcours à partir de 12 points différents répartis entre les cinq rues présentées (voir la Figure 6.3). Les scènes urbaines présentaient des conditions similaires par rapport à la configuration des rues et de l'environnement bâti (voir la Figure 6.4). Nous avons choisi de faire 12 parcours différents pour deux raisons principales. Premièrement, nous voulions réduire les effets de la rue elle-même sur les résultats de l'évaluation de l'expérience, en supposant donc que les résultats peuvent être attribués à diverses rues virtuelles et non à une seule rue spécifique.

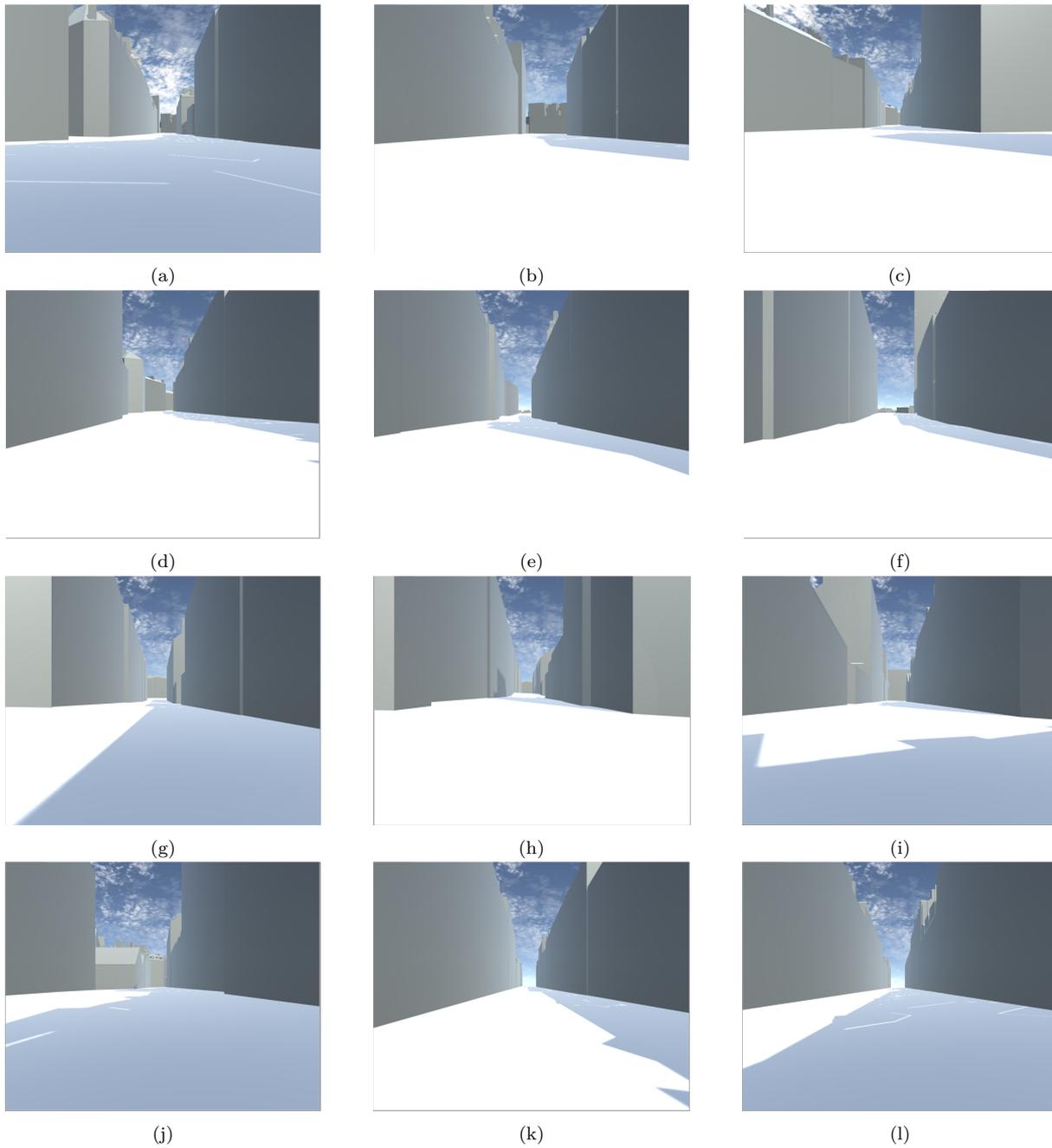


FIGURE 6.4 – Vue immergée de chaque début de parcours et leurs directions dans le modèle 3D.

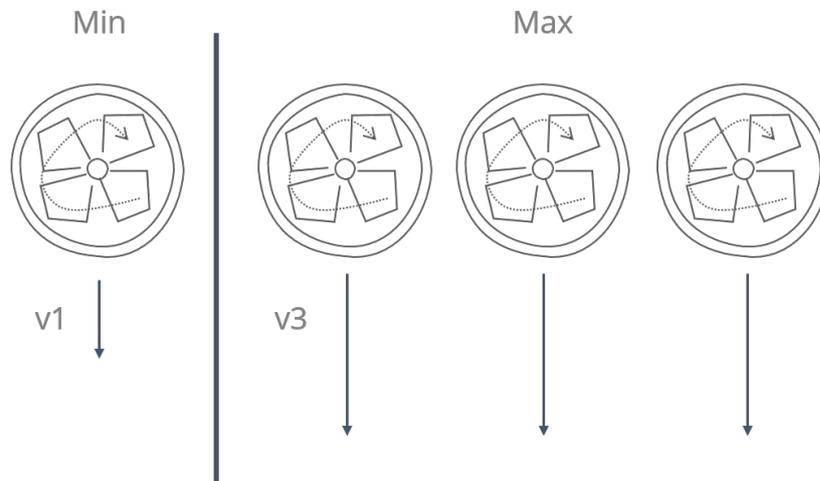


FIGURE 6.5 – Condition minimale et maximale de la force du vent.

TABLE 6.1 – Conditions expérimentales de la deuxième expérience. Elles ont été présentées de façon aléatoire aux participants.

Conditions	Force	Direction	Nuages
FMin	Minimale	Face	
FMax	Maximale	Face	
BMin	Minimale	Arrière	
BMax	Maximale	Arrière	
SMin	Minimale	Côté	
SMax	Maximale	Côté	
FMinV	Minimale	Face	X
FMaxV	Maximale	Face	X
BMinV	Minimale	Arrière	X
BMaxV	Maximale	Arrière	X
SMinV	Minimale	Côté	X
SMaxV	Maximale	Côté	X

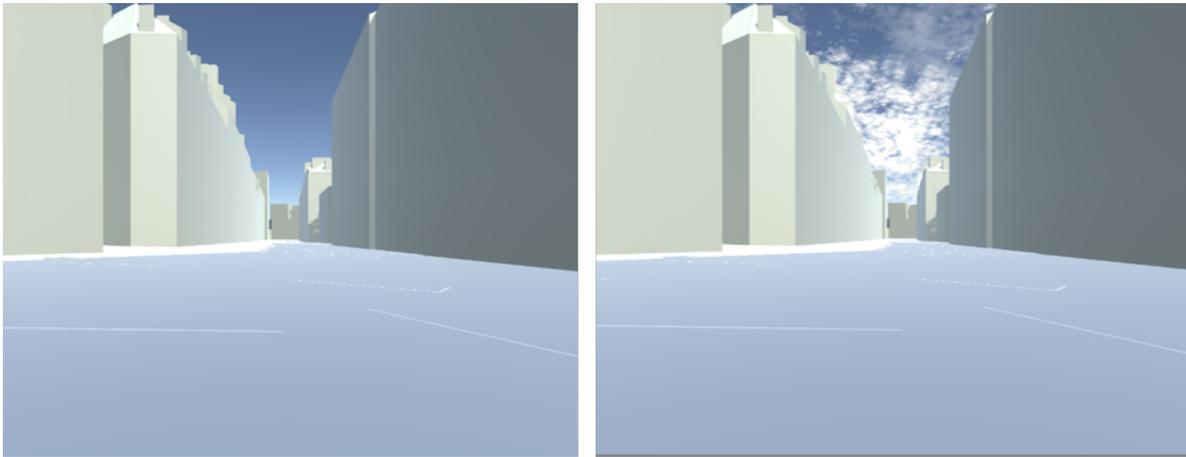


FIGURE 6.6 – Modèle 3D avec et sans nuages (suggestion visuelle de la présence du vent).

Deuxièmement, et dans la même perspective, il s'agissait de réduire l'effet de répétition et la monotonie qu'aurait engendrés le même parcours présenté 24 fois aux participants. Les rues virtuelles ont été présentées de façon aléatoire aux participants en faisant l'hypothèse que cela n'a pas d'influence sur les résultats finaux.

6.4 Hypothèses

Les vitesses moyennes des flux d'air mesurées avec un anémomètre à la position du participant selon la vitesse des ventilateurs sont : $V1 : 2.2m/s \sigma 0.1m/s$ et $V3 : 3.3m/s \sigma 0.15m/s$. On déduit que les forces du vent restituées dans le dispositif se situent en valeur entre le degré 2 de l'échelle de Beaufort (vitesse du vent entre $1.60m/s$ et $2.99m/s$) et le degré 3 de l'échelle ($3m/s$ et $5.19m/s$). Nous voulons évaluer les hypothèses suivantes :

- **H1** : les niveaux de vitesse du vent sur l'échelle de Beaufort perçus par les participants iront au-delà du niveau réel mesuré. Nous supposons ainsi que les participants percevront des forces de vent plus élevées que celles qui ont été mesurées ;
- **H2** : Le déplacement des nuages (suggestion visuelle de la présence du vent) donnera l'impression que le vent est plus fort que sans cette suggestion ;
- **H3** : Le déplacement des nuages aidera à mieux comprendre la direction du vent (notamment pour la condition de force maximale où il y a trois ventilateurs allumés qui impliquent donc trois directions) ;

- **H4** : L'erreur sur la direction du vent sera plus grande avec la force maximale du vent à cause du fonctionnement de plusieurs ventilateurs en même temps.

6.5 Procédure

Chaque participant est arrivé à la salle d'expérimentation où la procédure lui a été expliquée. Il/elle a été doté(e) d'une manette de jeu vidéo afin de lui permettre d'interagir avec l'application, ainsi que d'écouteurs pour réduire les sons présents dans la salle. Nous avons utilisé un bruit blanc constant lors des parcours afin de réduire les différents sons dans la salle (ventilateurs, relais, etc.). La manette servait à se déplacer dans la scène virtuelle et à sélectionner et valider les réponses. Avant de commencer l'expérience, nous avons demandé à chaque participant de lire le tableau de référence des valeurs de l'échelle de Beaufort où sont présentées les valeurs de zéro à huit, les noms correspondant à chaque valeur et leurs effets mécaniques équivalents sur terre (voir le Tableau 6.2). Ce tableau a été présenté à chaque fois que nous demandions d'évaluer la force du vent (voir la Figure 6.8).

Le participant est placé au milieu des ventilateurs et devant l'écran de la salle (voir la Figure 6.7) où la hauteur de la caméra virtuelle a été ajustée en fonction de sa taille. Il commence un parcours dans une rue virtuelle sous l'une des conditions aérauliques prédéfinies. Le parcours étant libre, le participant avait la possibilité de se déplacer dans toutes les directions ou bien de s'arrêter où il le désirait. Néanmoins la rotation de la caméra virtuelle lui était interdite afin d'éviter une latence au moment d'ajuster la direction du vent. quinze secondes après le début du parcours, l'écran d'évaluation de la force du vent est présenté au participant (voir Figure 6.8). Il devait choisir la force du vent perçue sur l'échelle de zéro à huit basée sur la description de référence des valeurs.

Suite à l'évaluation de la force du vent, le participant devait valider la direction d'où il percevait sa provenance (voir Figure 6.9). Après cette évaluation, le participant commence un nouveau parcours libre sous une autre condition aéraulique et recommence l'exercice jusqu'à la finalisation des 12 (x2) différentes conditions d'évaluation.

6.6 Résultats

Dans cette section, nous présentons les analyses statistiques descriptives et inférentielles de la perception des propriétés du vent (direction et force), par rapport à l'échelle

TABLE 6.2 – Tableau des valeurs de référence de l'échelle de Beaufort utilisé pour l'évaluation.

Force	Termes	Effets à terre
0	Calme	La fumée monte verticalement. Les feuilles des arbres ne témoignent d'aucun mouvement.
1	Très légère brise	La fumée indique la direction du vent. Les girouettes ne s'orientent pas.
2	Légère brise	On sent le vent sur le visage. Les feuilles s'agitent. Les girouettes s'orientent.
3	Petite brise	Les drapeaux flottent au vent. Les feuilles sont sans cesse en mouvement.
4	Jolie brise	Les poussières s'envolent. Les petites branches plient.
5	Bonne brise	Le tronc des arbustes et arbrisseaux en feuilles balance. La cime de tous les arbres est agitée. Des vaguelettes se forment sur les eaux intérieures.
6	Vent frais	On entend siffler le vent. Les branches de large diamètre s'agitent. Les parapluies sont susceptibles de se retourner.
7	Grand frais	Tous les arbres balancent. La marche contre le vent peut devenir difficile.
8	Coup de vent	Les branches sont susceptibles de casser. La marche contre le vent est très difficile, voire impossible.



FIGURE 6.7 – Localisation des participants lors de l'expérience.

ÉVALUATION DE LA FORCE DU VENT

Veuillez choisir la force ressentie du vent entre 0 et 8.

<p>0 Calme</p>	<p>-> La fumée monte verticalement. Les feuilles des arbres ne témoignent d'aucun mouvement.</p>	<p>5 Bonne brise</p>	<p>-> Le tronc des arbustes et arbrisseaux en feuilles balance. La cime de tous les arbres est agitée. Des vaguelettes se forment sur les eaux intérieures.</p>
<p>1 Très légère brise</p>	<p>-> La fumée indique la direction du vent. Les girouettes ne s'orientent pas.</p>	<p>6 Vent frais</p>	<p>-> On entend siffler le vent. Les branches de large diamètre s'agitent. Les parapluies sont susceptibles de se retourner.</p>
<p>2 Légère brise</p>	<p>-> On sent le vent sur le visage. Les feuilles s'agitent. Les girouettes s'orientent.</p>	<p>7 Grand frais</p>	<p>-> Tous les arbres balancent. La marche contre le vent peut devenir difficile.</p>
<p>3 Petite brise</p>	<p>-> Les drapeaux flottent au vent. Les feuilles sont sans cesse en mouvement.</p>	<p>8 Coup de vent</p>	<p>-> Les branches sont susceptibles de casser. La marche contre le vent est très difficile, voire impossible.</p>
<p>4 Jolie brise</p>	<p>-> Les poussières s'envolent. Les petites branches plient.</p>	<p>Valider</p>	

FIGURE 6.8 – Écran d'évaluation de la force du vent basé sur l'échelle de Beaufort.



FIGURE 6.9 – Écran d'évaluation de la direction du vent.

de force du vent de Beaufort.

6.6.1 Analyses statistiques

L'analyse a pris en compte la différence entre les paramètres simulés initiaux de la force du vent dans la scène (rendus dans diverses conditions expérimentales) et les réponses des participants.

Une transformation en racine carrée a été appliquée aux données de la direction du vent afin de limiter l'amplitude de l'échelle des valeurs des réponses des participants et gérer ainsi les valeurs aberrantes. Les valeurs obtenues, en termes de direction et de force du vent, ont été analysées à l'aide d'un modèle linéaire multi-niveau, qui est une régression tenant compte de la dépendance des données (A. P. FIELD et al., 2012). Le modèle comprend la variable à expliquer (différence de direction et différence de force), la variable explicative (les différents conditions) et le facteur participant (qui tient compte du fait que les données proviennent des mêmes personnes) comme effet aléatoire.

Comme pour l'expérience précédente, le test *post-hoc* de *Tukey* a été réalisé pour comparer toutes les conditions de représentation de la variable catégorielle. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel R, avec la fonction *lme* du paquet *nlme*. La

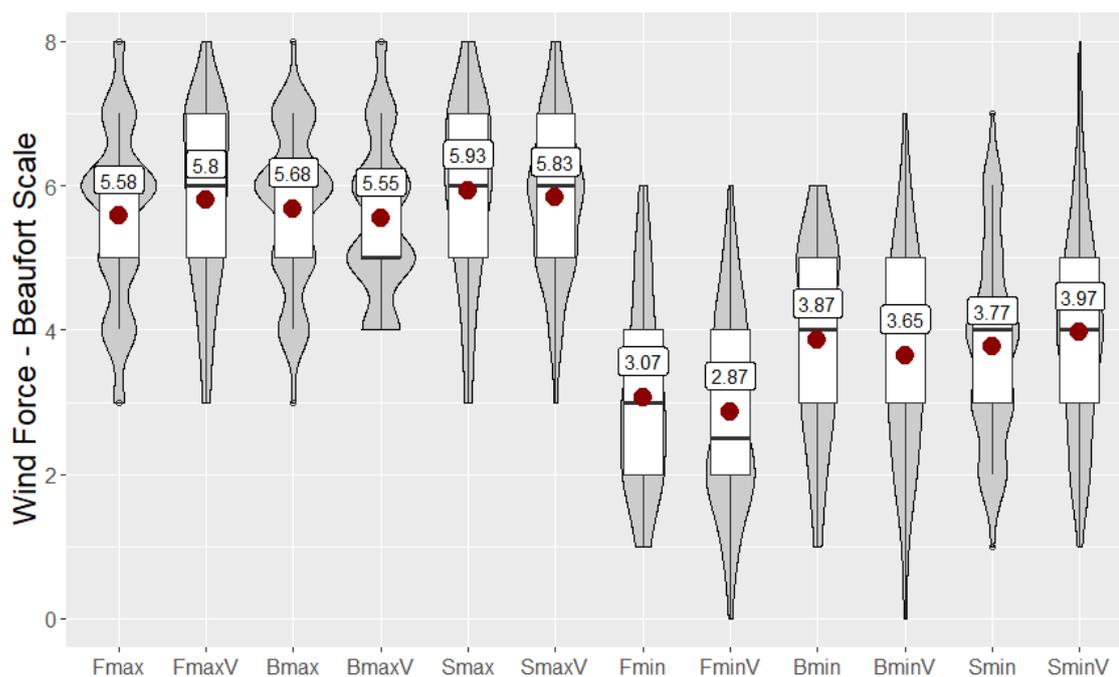


FIGURE 6.10 – *Box plot* et *violin plot* des réponses de la force du vent selon les différentes conditions. Le point rouge correspond à la valeur moyenne. Les lignes horizontales représentent les quartiles. La ligne horizontale en gras est la médiane. Le *violin plot* montre la distribution des réponses pour chaque condition.

fonction *glht* (paquet *multcomp*) a été utilisée pour les comparaisons par paires et nous avons réalisé une vérification visuelle de la distribution normale des résidus des données.

6.6.2 Force du vent

La distribution des réponses (brutes) concernant la force du vent est présentée dans la Figure 6.10. Les conditions utilisées dans l'expérience ont eu un effet significatif dans l'estimation de la force du vent, $\chi^2(11) = 194.61, p < 0.0001$. Le test *post-hoc* de *Tukey* a révélé des différences statistiquement significatives présentées dans le Tableau 6.3. Les valeurs moyennes analysées correspondent à la différence entre la valeur envoyée et les valeurs moyennes de réponses des participants (voir la Figure 6.11).

TABLE 6.3 – Tableau des différences statistiquement significatives concernant l'écart (différence entre la valeur envoyée et la valeur perçue) de la force du vent. Les étoiles représentent le niveau de signification (* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$).

	FMax	FMaxV	BMax	BMaxV	SMax	SMaxV	FMin	FMinV
FMin	***	***	***	***	***	***		
FMinV	***	***	***	***	***	***		
BMin	*	***	**	*	***	***	**	***
BMinV	***	***	***	***	***	***		**
SMin	**	***	***	**	***	***	*	***
SMinV		**	*		***	**	***	***

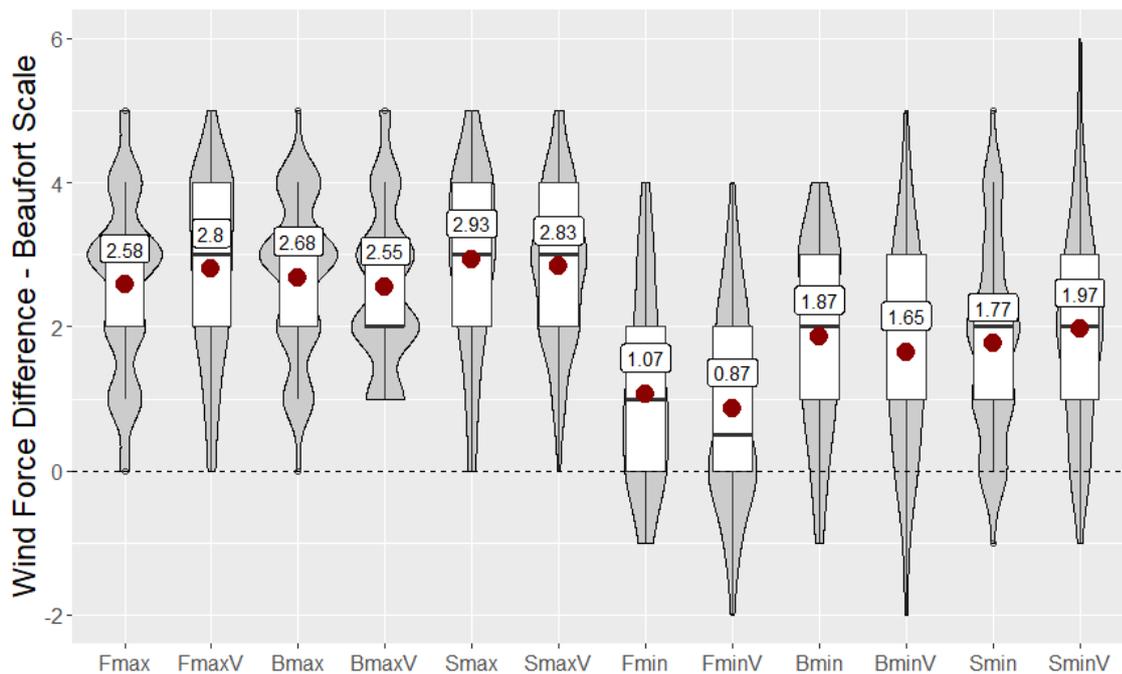


FIGURE 6.11 – *Box plot* et *violin plot* de l'écart de la force du vent selon les différentes conditions. La valeur 0 (ligne pointillée) correspond à la valeur envoyée. Note : afin de faciliter la lecture du graphique, les relations des différences statistiques entre les conditions sont présentées dans le Tableau 6.3.

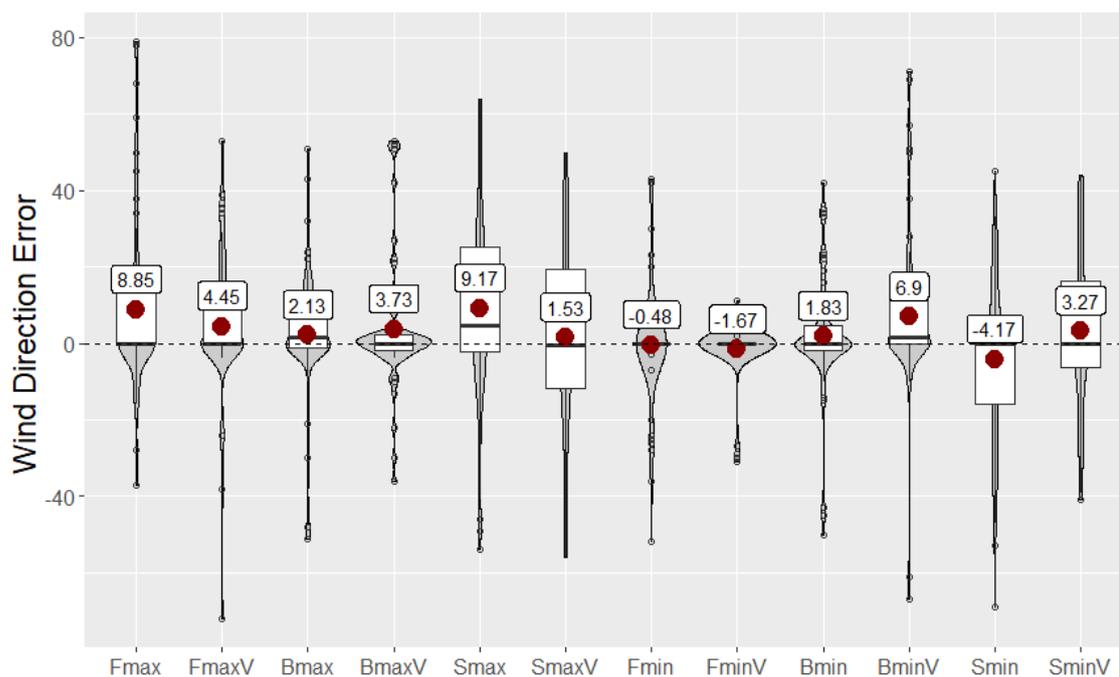


FIGURE 6.12 – *Box plot* et *violin plot* de l'écart (par rapport aux valeurs envoyées) des réponses de la direction du vent selon les différentes conditions. La valeur 0 (ligne pointillée) correspond à la valeur envoyée.

6.6.3 Direction du vent

La distribution des réponses concernant l'écart de la direction du vent par rapport à la valeur envoyée (qui correspond à la valeur 0 de la figure) est présentée dans la Figure 6.12. Les conditions utilisées dans l'expérience ont eu un effet significatif sur l'estimation de la direction du vent, $\chi^2(11) = 109.19, p = 0.0001$. Le test *post-hoc* de *Tukey* a révélé des différences statistiquement significatives présentées dans le Tableau 6.4. Les valeurs moyennes analysées correspondent à la différence entre la valeur envoyée, et les valeurs moyennes de la racine carrée¹ des valeurs absolues² des réponses des participants (voir la Figure 6.13).

1. Une transformation de racine carrée a été appliquée afin de limiter l'amplitude de l'échelle des valeurs des réponses des participants et gérer les valeurs aberrantes des réponses.

2. Nous avons utilisé les valeurs absolues des réponses pour l'analyse afin de nous concentrer sur l'écart de la direction quel que soit le côté dont elles proviennent.

TABLE 6.4 – Tableau des différences statistiquement significatives concernant la racine carrée des valeurs absolues de l'écart (différence entre la valeur envoyée et la valeur perçue) de la direction du vent. Les étoiles représentent le niveau de signification (* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$).

	FMax	FMaxV	BMax	BMaxV	SMax	SMaxV	FMin	FMinV
SMax	*	***	*	**			***	***
SMaxV	**	***	*	**			***	***
FMin					***	***		
FMinV	***	**	***	***	***	***		
BMin					*	**		***
BMinV								***
SMin		*					***	***
SMinV							***	***

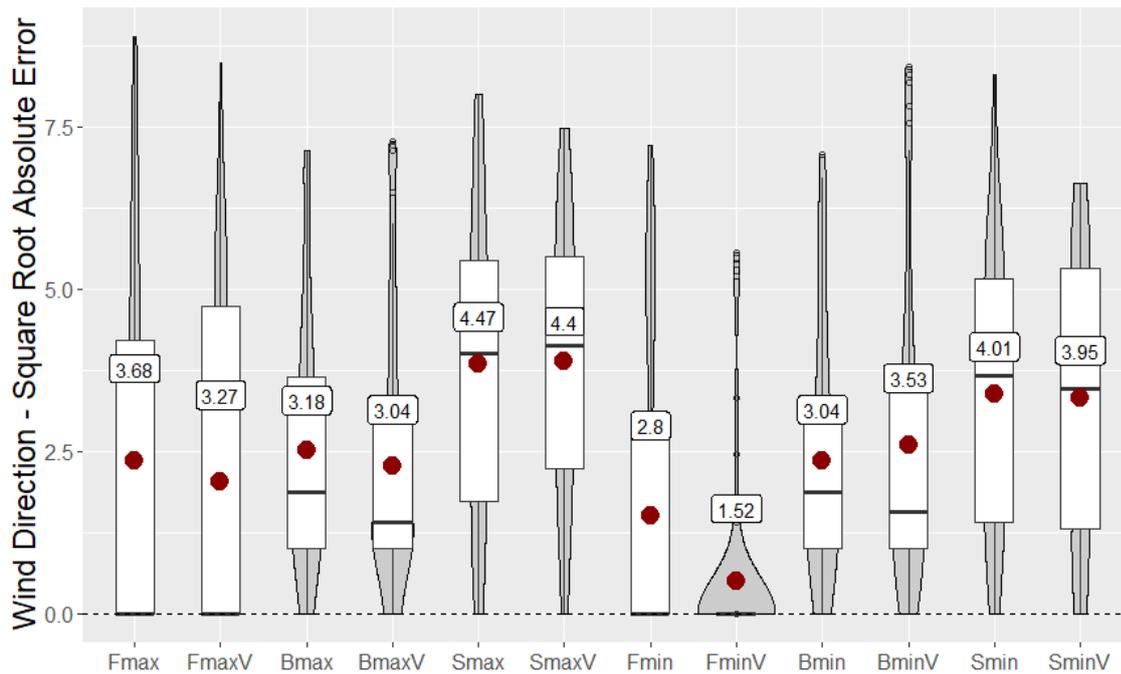


FIGURE 6.13 – Box plot et *violin plot* de la racine carrée des valeurs absolues de l'écart de la direction du vent selon les différentes conditions. La valeur 0 (ligne pointillée) correspond à la valeur envoyée. Note : afin de faciliter la lecture du graphique, les relations des différences statistiques entre les conditions sont présentées dans le Tableau 6.4.

6.7 Discussion

Les résultats de cette étude montrent que, d'après les conditions utilisées dans l'expérience, la force du vent est surestimée tant pour la force minimale que pour la force maximale envoyée par rapport à l'échelle de Beaufort. La valeur de la force minimale utilisée était de 2.2m/s (force 2 de Beaufort), tandis que les valeurs moyennes données par les participants se trouvent entre les valeurs 3 et 4 de Beaufort. Concernant la force maximale, la valeur envoyée était de 3.3m/s (force 3 de Beaufort), tandis que les réponses moyennes des participants se trouvent entre les forces 5 et 6 de l'échelle. Cela nous permet d'accepter l'hypothèse **H1** (voir Figure 6.10). Nous considérons que la surestimation de la force peut être liée à deux possibles facteurs. Le premier facteur est la localisation des ventilateurs à proximité des participants. VERLINDEN et al. (2013) ont utilisé une configuration de ventilateurs similaire, néanmoins ils les ont placés dans la partie supérieure du dispositif. Ils ont noté que les participants remarquent un manque de force des ventilateurs pour que la simulation soit plus réaliste. Cela ne suffit pas à dire que la localisation au sol des ventilateurs a produit la surestimation de la force du vent ; en effet VERLINDEN et al. (2013) n'ont pas évalué la perception de la force du vent et leur simulation étudiait les effets du vent en mer où l'incidence du vent est plus remarquable que sur terre. Néanmoins, nous jugeons très pertinent de reproduire notre expérience en déplaçant les ventilateurs du sol vers la partie supérieure. Cela pourrait se rapprocher plus de l'incidence du vent sur un piéton dans un environnement urbain. Le deuxième facteur de surestimation de la force du vent est lié à l'effet sonore utilisé qui a pu suggérer une force plus élevée. En effet, nous avons utilisé un bruit blanc constant et ce signal sonore a été considéré par certains participants comme le bruit d'un vent fort. ce qui nous fait penser à la reproduction de l'expérience sans ce bruit.

La direction du vent n'a pas montré d'incidence dans l'estimation de la force maximale du vent. Il n'y a pas de différences statistiquement significatives entre les trois niveaux de la condition (devant, arrière, côté). Néanmoins, concernant la force minimale, nous trouvons des différences entre la force provenant d'en face (**FMin** et **FMinV**) et les deux autres directions. Cela pourrait être lié à l'exposition du visage au vent de face, mais aussi au fait que c'étaient les seules conditions où le participant pouvait voir (indirectement) un seul ventilateur allumé. Il faut noter que ces conditions ont été les plus proches de la valeur de force réellement envoyée : **FMinV** a eu un écart moyen de 0.87 par rapport à la valeur envoyée et **FMin** 1.07 (augmentation de l'écart de 22.9% par rapport à **FMinV**).

Parallèlement, **BMin** (114.9%), **BMinV** (89.6%), **SMin** (103.4%) et **SMinV** (126.4%) ont présenté une augmentation de l'écart entre la valeur envoyée et la valeur perçue par rapport à **FMinV**.

L'étude montre, selon nos conditions expérimentales, que la variable visuelle (suggestion des effets mécaniques du vent sur les nuages) n'apporte pas de différences statistiquement significatives ni pour la compréhension de la force du vent ni pour sa direction, et ainsi nous rejetons les hypothèses **H2** et **H3**.

Concernant la compréhension de la direction du vent (**D2**), nous trouvons que pour la force maximale envoyée, les différences se trouvent dans le vent provenant des côtés (**SMax**, **SMaxV**) par rapport aux directions d'en face et de l'arrière. Ainsi, il y a une augmentation de l'erreur avec le vent provenant des côtés et il n'y a pas de différences statistiquement significatives entre le vent d'en face et celui de l'arrière. Comparées à **FMaxV** (qui présente l'écart de direction le plus réduit des conditions de force maximale 3.04) **SMax** et **SMaxV** ont présenté une augmentation de l'écart de 47% et 44% respectivement. Au regard de la force minimale envoyée, le vent frontal (**FMinV**) a une différence statistiquement significative avec le vent provenant de l'arrière et celui provenant des côtés (voir Figure 6.13). **FMinV** a été la condition dont les réponses ont été les plus proches de la valeur envoyée (écart de 1.52). Comparées à cette condition, **BMin** a eu une augmentation de 100%, **BMinV** de 132.23%, **SMin** de 163.81% et **SMinV** de 159.86%. Le vent frontal montre l'erreur la plus réduite par rapport à la direction. Comme nous l'avons évoqué pour la force du vent, ce résultat peut être lié à la visibilité du ventilateur. Si nous comparons les conditions de la force maximale à leurs homologues de la force minimale en termes de direction perçue, nous trouvons que : **FMax** et **FMin** ne présentent pas de différence statistiquement significative ; **FMaxV** et **FMinV** présentent une différence statistiquement significative ; **BMax** et **BMin** ne présentent pas de différence ; **BMaxV** et **BMinV** ne présentent pas de différence ; **SMax** et **SMin** ne présentent pas de différence ; **SMaxV** et **SMinV** ne présentent pas de différence. Ainsi, nous pourrions accepter l'hypothèse **H4** seulement pour les conditions **FMaxV** et **FMinV**. Nous rejetons donc cette hypothèse et concluons que, la direction du vent peut être comprise de façon similaire, même si un ou trois ventilateurs sont utilisés.

6.8 Limites et perspectives

Il existe un possible biais de l'expérience lié à la visibilité du ventilateur frontal lors des évaluations de la force et de la direction du vent. Initialement, cette expérience avait aussi pour objectif de comparer l'utilisation d'un HMD et d'un écran ; cela n'a pas été possible à cause de la crise sanitaire du COVID-19 car il fallait limiter l'utilisation d'éléments en contact avec les participants ; de plus l'utilisation de produits nettoyants auraient pu endommager le fonctionnement de certains matériels. Nous avons donc comme perspective de réaliser à nouveau l'expérience en utilisant le dispositif HMD pour évaluer ses effets.

Notons que lors de cette expérience les participants portaient des masques à cause de la crise sanitaire. Nous n'avons pas observé de perturbations particulières de l'évaluation des propriétés du vent due à ces éléments.

Nous considérons aussi nécessaire de mener à bien une nouvelle expérience avec une localisation des ventilateurs à un niveau supérieur, afin d'évaluer l'incidence de la provenance du vent dans l'axe vertical. En effet, le fait d'avoir le vent provenant de la partie inférieure peut engendrer des sensations propres à un comportement aéraulique fort, notamment la sensation d'un vent fort sur les jambes. Il est aussi important de prendre en compte pour une future expérience la façon de réduire le bruit ambiant, car nous considérons que le bruit blanc utilisé peut aussi suggérer la présence et même l'intensité du vent. Cela pourrait faire l'objet d'une future expérience, sans l'image mais en utilisant uniquement le rendu sonore et la restitution tactile à l'aide des ventilateurs.

Le dispositif, dans les conditions de l'expérience, a montré un intérêt pour restituer un intervalle de forces du vent entre les niveaux 3 et 6 de l'échelle de Beaufort dans un espace urbain. Pour cette expérience, nous avons testé les valeurs minimales et maximales de la force produite par les ventilateurs. Nous pouvons supposer qu'en utilisant les vitesses intermédiaires des ventilateurs, nous pourrions faire ressentir les valeurs entre les niveaux 3 et 6 de l'échelle Beaufort. Il serait donc pertinent de compléter le dispositif avec d'autres éléments ou configurations (spatiales, visuelles, sonores) afin de créer l'illusion de vents faibles, correspondants aux niveaux 1 et 2 de l'échelle, afin de simuler le comportement résultant du vent en ville à l'aide de la réalité virtuelle.

6.9 Conclusion

L'expérience a montré la correcte compréhension de la direction du vent avec le dispositif. Nous voyons un intérêt pour la représentation du vent en RV au fait qu'il n'y a pas de différence significative entre la perception de la direction du vent avec un seul ventilateur ou avec plusieurs ventilateurs allumés. Nous remarquons l'intérêt pour la représentation du vent dans le champ de l'urbanisme car le fait d'avoir plusieurs ventilateurs allumés permet de créer un effet plus enveloppant et moins focalisé qui pourrait être plus proche des effets aérauliques ressentis en ville.

Concernant la force du vent, nous voyons que le dispositif peut créer l'illusion d'un vent plus fort que celui qui est vraiment envoyé. Cela montre un intérêt au moment de penser à la taille et la puissance des ventilateurs nécessaires. En effet, avec trois ventilateurs qui restituent une force de niveau 3 dans l'échelle de Beaufort, le dispositif peut faire ressentir une force de niveau 6 sur l'échelle de Beaufort. Cela met en évidence le fait qu'avec une configuration de ventilateurs plus puissants, nous pourrions simuler les niveaux plus élevés de l'échelle de Beaufort pour créer l'illusion de situations aérauliques critiques.

La suggestion de la présence du vent par la restitution tactile montre un intérêt dans les champs de l'architecture et de l'urbanisme, d'une part pour expérimenter ce phénomène physique aux différentes étapes de conception du projet, et d'autre part pour faire ressentir les résultats des simulations aérauliques (pensées pour évaluer les effets du vent sur l'environnement bâti) et favoriser la perception sensible des personnes qui habitent l'espace urbain. Ces effets, ajoutés aux restitutions audiovisuelles, immersives et interactives propres de la réalité virtuelle, montrent un intérêt pour créer l'illusion d'être dans un environnement urbain, qui pourrait être exploité, par exemple, au moment de la communication d'un projet.

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Sommaire

7.1	Les expressions du vent	151
7.1.1	Suggestion de la présence du vent par ses effets mécaniques sur les éléments du contexte	151
7.1.2	Visualisation de l'écoulement du vent	152
7.1.3	Restitution tactile du vent	154
7.2	Interfaces sensorielles	156
7.2.1	Projection de la scène virtuelle	156
7.2.2	Taille et localisation des ventilateurs	157
7.2.3	Écouteurs avec l'option d'annulation de bruit	160
7.3	Potentiel dans la représentation des ambiances urbaines . . .	161

7.1 Les expressions du vent

Dans notre recherche nous nous sommes intéressés aux différents moyens d'expression de la présence du vent et de ses propriétés dans une scène virtuelle. Nous avons trouvé des éléments partagés ainsi que des différences dans la finalité du message à transmettre et la façon de le présenter.

Nous avons caractérisé les types de représentations selon trois groupes qui se reflètent dans les différentes représentations utilisées dans notre première expérience :

- la suggestion de la présence du vent par ses effets mécaniques sur les éléments du contexte ;
- la visualisation de l'écoulement du vent ;
- la restitution tactile du vent.

7.1.1 Suggestion de la présence du vent par ses effets mécaniques sur les éléments du contexte

Ce type de représentation est la façon la plus naturelle de manifester la présence du vent quand il n'est pas possible (ou souhaité) d'ajouter une restitution tactile du phénomène. C'est par ce moyen que nous le percevons dans une photographie ou dans un film (entre autres). C'est aussi la façon dont nous percevons le vent dans le monde réel quand on regarde l'extérieur à travers une fenêtre fermée. Les indices de référence de l'échelle de Beaufort sont principalement visuels et c'est par ces éléments que nous pouvons nous faire une idée de la force du vent sans équipement de mesure.

Nous avons utilisé ce type de représentation lors de notre première expérience, elle constituait notre scène de référence qui était présente dans toutes les conditions évaluées. Nous avons suggéré la présence du vent par le mouvement des arbres, par le déplacement de nuages et par les bruits du vent et des feuilles. En termes d'évaluation, dans les conditions d'expérimentation utilisées dans notre prototype, ce type de représentation a été celle avec laquelle les participants ont eu le plus de mal à identifier la direction et la force du vent.

Nous considérons que pour mieux se concentrer sur l'incidence de ce type de représentation dans les conditions évaluées, nous pourrions expérimenter une condition qui sépare les restitutions visuelles et sonores des effets mécaniques du vent sur le contexte. Le rendu sonore a été présent dans toutes les conditions expérimentales de nos deux expériences. En distinguant les paramètres visuels et sonores, nous pourrions dans une expérience future

évaluer le degré d'incidence de la seule restitution sonore du vent dans la scène de réalité virtuelle.

Pour notre deuxième expérience, nous avons utilisé la représentation visuelle des effets mécaniques du vent sur le contexte uniquement par la présence et le déplacement des nuages. Cela a constitué une des conditions d'évaluation. Les résultats de l'expérience ont montré que le fait d'ajouter les nuages n'a pas produit de différence statistiquement significative pour l'évaluation des propriétés du vent.

Dans cette expérience nous avons utilisé l'échelle de Beaufort pour donner des indices de référence aux participants pour l'évaluation de la force perçue. Ces indices sont des effets observables sur terre, tels que le déplacement de la poussière, des feuilles, les mouvements des arbres, etc. Nous avons pris la décision de ne pas représenter ces effets sur la scène virtuelle, afin de concentrer l'évaluation sur la perception de la restitution tactile du vent.

Suite aux résultats de l'expérience, nous avons attribué des valeurs de force de Beaufort à deux configurations différentes de restitution du vent des ventilateurs. Selon notre configuration de force minimale (un ventilateur à la vitesse minimale) les réponses moyennes des participants se situent entre les valeurs 3 et 4 de l'échelle, tandis que pour la configuration de force maximale (trois ventilateurs à la troisième vitesse) les réponses moyennes se situent entre les valeurs 5 et 6 de l'échelle. Ces valeurs ne correspondent pas à la force du vent mesuré (valeurs 2 et 3 de l'échelle selon la vitesse du vent), mais à la perception des participants de l'expérience selon les différentes conditions présentées dans l'évaluation.

Nous considérons donc comme une perspective d'utiliser les résultats obtenus dans nos expériences concernant la restitution tactile et de les assembler avec les représentations visuelles connues de l'échelle Beaufort dans une prochaine expérience. Cela permettra de faire une évaluation de la cohérence multisensorielle de la force de vent et d'analyser l'influence des différents types de représentations dans une scène virtuelle urbaine.

7.1.2 Visualisation de l'écoulement du vent

Cette représentation, à la différence des deux autres, n'a pas pour unique finalité de stimuler les sens de l'observateur mais de lui fournir l'information nécessaire pour analyser et comprendre le phénomène, même si ces rendus colorés ne passent pas inaperçus par leur expression visuelle comme nous l'avons vu dans les exemples de visualisation de simulations CFD présentés par SALZBRUNN, JANICKE et al. (2008) et BRAMBILLA et al. (2012) dans le chapitre 3.

La visualisation de l'écoulement du vent est l'un des moyens par lesquels ce phénomène physique est analysé et représenté dans les champs de l'architecture, de l'urbanisme et de l'ingénierie (cf. section 2.3). Que ce soit par des schémas du comportement du vent ou pour visualiser des résultats de simulations aérauliques, la constante reste la même : rendre visible l'écoulement du vent ou l'une de ses propriétés (pressions sur les surfaces, vitesse, etc.).

Nous avons choisi d'intégrer les résultats d'une simulation CFD et sa visualisation dans la scène de réalité virtuelle lors de notre première expérience. Parmi les divers types de visualisation scientifique du vent, nous avons opté pour l'utilisation et l'animation de *streamlines* dans la scène. Nous pensons que ce type de représentation permet de bien faire comprendre l'interaction du vent avec l'environnement bâti, ainsi que les différents effets résultant de cette interaction. C'est pourquoi les *streamlines* sont exploitées tant dans les représentations scientifiques (voir la section 2.3) que dans le champ de la réalité virtuelle (voir la section 3.3) pour dessiner l'écoulement du vent. Néanmoins les résultats de notre première expérience ont montré qu'il est difficile de faire comprendre les propriétés du vent (force et direction) par ce type de représentation dans les conditions de notre environnement expérimental. Le fait de présenter ces éléments avec un déplacement tridimensionnel dans un contexte immersif a pu engendrer des confusions chez les participants à l'expérience. La visualisation des *streamlines* a réduit de 18% l'erreur de la perception de la direction du vent par rapport à la scène de référence. Néanmoins, les résultats n'ont pas été aussi bons que ceux de la restitution tactile, où nous trouvons une réduction de l'erreur de 40% par rapport à la scène de référence. Concernant la force du vent, la restitution visuelle n'a pas présenté de différence statistiquement significative par rapport à la scène de référence, tandis que la restitution tactile a présenté une réduction de 12.8% e l'erreur par rapport à la scène de référence.

C'est pourquoi nous pensons à deux possibles perspectives pour ce sujet. Les *streamlines* d'un point de vue immergé pourront être évaluées dans une future expérience pour comprendre dans quelle mesure elles permettent de faciliter la compréhension des effets aérauliques résultants de l'interaction du vent avec l'environnement. Cela pourrait avoir un effet positif sur le processus de conception architecturale ou urbaine pour mettre en question, ou appuyer certains choix. La deuxième perspective concerne la compréhension des propriétés du vent d'un point vue immergé. Nous pensons que d'autres types de visualisations de l'écoulement du vent devraient être explorées dans un environnement virtuel dans une future expérience, afin d'analyser de quelles façons exploiter leurs potentiels.

Une hypothèse pourrait être d'utiliser les *streamlines* mais en limitant leur déplacement dans un plan horizontal. Les représentations avec des flèches et des surfaces devraient être aussi évaluées afin de trouver quel type de visualisation est la plus pertinente pour suggérer la direction et la force du vent. Cela pourrait donner des pistes pour la représentation des phénomènes aérodynamiques orientée vers les professionnels qui travaillent autour du projet.

Dans la même perspective, il serait intéressant d'évaluer l'incidence de ce type de représentations du vent dans un environnement virtuel tout au long des différentes étapes de conception d'un projet. Nous formons l'hypothèse que cela pourrait donner des éléments aux concepteurs au-delà des valeurs quantitatives qui pourraient favoriser la compréhension des effets du vent et sa discussion dans les étapes de conception et de communication du projet. Une mise en cohérence des modes de représentation du vent d'un point à la fois alo-centrée sur des maquettes et égo-centré dans un dispositif immersif tel que CORAULIS¹ (Centre d'Observation en Réalité Augmentée et Lieu d'Immersion Sonore) (AAU, p. d.) permettrait la compréhension des différentes dimensions du vent.

Une autre perspective de ce travail serait d'évaluer la restitution visuelle du vent sur site à l'aide de la réalité augmentée. Cela permettrait d'analyser les résultats d'une simulation CFD et de les faire interagir avec l'environnement bâti réel. Une possible limitation de cette perspective se présente si le vent réel ressenti sur site n'est pas cohérent avec la représentation visuelle du phénomène dans le dispositif de réalité augmentée. En effet, les résultats de notre première expérience ont montré que lors de l'évaluation de la direction du vent, l'effet tactile est dominant par rapport aux effets visuels. Nous n'avons pas trouvé de différence statistiquement significative pour la perception de la direction du vent entre la condition tactile et la condition visuelle+tactile.

7.1.3 Restitution tactile du vent

Ce troisième type de représentation stimule le sens auquel on associe le plus le vent, le toucher. La littérature présente différents exemples d'explorations pour intégrer la restitution tactile du vent aux systèmes de réalité virtuelle (cf. chapitre 3).

Les résultats des expériences évaluées dans la littérature ont montré que l'utilisation du vent dans les environnements virtuels augmente le sentiment de présence dans la scène virtuelle (LEHMANN et al., 2009; MOON et KIM, 2004; RIETZLER et al., 2017; VERLINDEN et al., 2013). Les résultats de notre première expérience sont cohérents avec

1. Plateforme immersive qui est actuellement en cours de finalisation à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

ces études. Ils montrent que les conditions qui utilisaient la restitution tactile du vent ont présenté un plus haut degré de présence dans l'environnement virtuel. Par rapport à la scène de référence, la condition tactile a présenté une augmentation du sentiment de présence de 8.3%.

De plus, les conditions qui utilisaient la restitution tactile du vent ont présenté les meilleurs résultats en termes de compréhension de la force et de la direction du vent lors de notre évaluation.

Les résultats de notre deuxième expérience ont montré une surestimation de la force du vent dans la scène virtuelle, par rapport aux indices donnés par l'échelle de Beaufort. Il faut rappeler que nous n'avons pas ajouté d'animations visuelles correspondant aux indices, ils étaient simplement rappelés à titre indicatif pour avoir une référence. Néanmoins, cela soulève certains questionnements : est-ce que cette surestimation de la force du vent est propre au dispositif et à nos conditions expérimentales ? Pourrait-elle aussi être présente dans le monde réel ? Il est possible qu'elle soit reproduite dans le monde réel dans des situations où, comme dans l'expérience, nous n'avons pas d'éléments de référence visuels qui permettent de corrélérer les indices de l'échelle Beaufort.

Par ailleurs, nous avons comparé nos deux expériences en termes de restitution tactile du vent. L'un des facteurs qui différencie cette restitution dans nos expériences est la variation du flux du vent lors des parcours. Pour notre première expérience, la restitution tactile du vent était basée sur les résultats d'une simulation aéraulique et le flux du vent était donc variable à fur et à mesure que le personnage virtuel se déplaçait. Cela nous semble plus naturel car le vent en ville est turbulent à cause de la rugosité et des obstacles présents ; il arrive par rafales et nous percevons ses variations. Quand le flux de vent est constant on peut l'associer à un vent fort. La restitution du vent dans notre deuxième expérience était constante. Notre objectif était d'évaluer les conditions données des ventilateurs. C'est pourquoi le flux restait inchangé du début du parcours jusqu'à sa fin.

Nous pensons que ce choix a peut-être biaisé la perception de la force du vent au moment de l'évaluation. Ainsi, le fait d'être exposé à un flux constant sur la durée de l'expérience a pu influencer la surestimation de la force du vent. FAURE et FLAMAND (2009) ont analysé les pourcentages du temps admissible de la gêne par type d'activité par rapport aux effets mécaniques du vent. Cela nous fait penser à la nécessité de considérer le temps d'exposition au vent dans une évaluation future.

Cette hypothèse est validée par DEVAL et BERGER (1983) (cité par SZUCS, 2005) qui

ont observé que toute situation confortable peut devenir inconfortable si elle est maintenue pendant un certain temps. Ils expliquent que cela est provoqué par un « phénomène de saturation des thermorécepteurs sensibles ». Les auteurs remarquent que « un écoulement turbulent est favorable par rapport à un écoulement régulier, car une certaine dynamique de l’ambiance est nécessaire pour maintenir le confort aérothermique » (DEVAL et BERGER, 1983, cité par SZUCS, 2005).

7.2 Interfaces sensorielles

Les interfaces utilisées dans cette recherche pour mettre en œuvre les différentes représentations du vent ont été : le groupe de ventilateurs, l’écran de la salle RV et les écouteurs avec l’option d’annulation de bruit. Nous nous sommes appuyés sur ces éléments pour mener à bien nos expériences, ce qui a également soulevé certaines questions que nous abordons ci-après.

7.2.1 Projection de la scène virtuelle

Nous avons choisi de projeter la scène virtuelle dans nos expériences à l’aide de l’écran de la salle d’expérimentation de RV de l’École Centrale Nantes. Nous nous sommes orientés vers ce dispositif au lieu d’un visiocasque de RV car nous ne voulions pas masquer tout ou partie du visage au regard des effets de la pression du vent. RIETZLER et al. (2017), conscients de ce problème, avaient décidé d’équiper l’avatar virtuel de lunettes et de gants afin de réduire la contradiction sensorielle pour les participants (être exposé au vent mais de ne pas le ressentir ni sur les mains ni sur une partie du visage à cause du casque de RV).

Dans l’état de l’art (cf. chapitre 3), les expériences qui ont été développées avec l’utilisation d’un visiocasque de RV (CARDIN et al., 2007; ITO et al., 2019; RIETZLER et al., 2017; « ZephVR », p. d.) ont intégré des sources de vent qui affectaient uniquement la tête des participants, tandis que les expériences avec des sources de vent qui avaient une influence sur la tête et le corps ont utilisé des écrans de projection² (KULKARNI et al., 2012; PLUIJMS et al., 2015; VERLINDEN et al., 2013).

2. Dans le projet « VirWind » (p. d.) il y avait une intention d’utiliser un ensemble de quatre tours qui contenaient des petits ventilateurs qui avaient une influence sur le corps et le visage de l’utilisateur, qui était immergé dans la scène virtuelle à l’aide d’un visiocasque de RV. Néanmoins le projet n’a pas été achevé et nous n’avons pas trouvé d’études qui montrent les effets de cette configuration.

Lors de notre première expérience, nous avons observé que, bien que la projection utilisant l'écran permettait l'influence du vent sur le visage, elle permettait aussi la visualisation (directe ou indirecte) des ventilateurs dans la salle d'expérimentation. C'est pourquoi nous avons prévu de tester une condition avec/sans visiocasque de RV dans notre deuxième expérience. Nous pensons qu'avec la configuration des ventilateurs utilisés (qui ont une influence tant sur le corps que sur le visage), le fait de masquer une portion du visage pourrait être moins perceptible comparé à une configuration de petits ventilateurs dont le flux est uniquement dirigé vers la tête des participants. Néanmoins, à cause de la crise sanitaire liée au COVID-19, nous avons été contraints de renoncer à utiliser le visiocasque afin de limiter les éléments avec lesquels les participants devaient interagir ainsi que l'exposition du visiocasque aux produits de nettoyage qui pouvaient potentiellement l'endommager. C'est pourquoi nous avons reporté cette étude comparative entre la projection de l'image sur l'écran et avec le HMD dans une future expérience.

7.2.2 Taille et localisation des ventilateurs

Pour mener à bien nos expériences, nous avons utilisé un groupe de huit ventilateurs localisés sur le sol de la salle de réalité virtuelle de l'École Centrale de Nantes. Nos expériences ont montré que la taille de ces ventilateurs (50,8cm de diamètre) et leur puissance (120W) sont adéquats pour tenter de simuler le vent résultant dans la ville. Nous remarquons particulièrement leur effet enveloppant des corps des participants. Cet effet est comparable au vent perçu dans l'espace public en situation réelle. Cela est cohérent avec la remarque de MOON et KIM (2004), qui indiquent que l'utilisation de plusieurs ventilateurs simultanément est plus naturelle pour les participants que l'utilisation d'un seul ventilateur.

Selon les conditions utilisées dans notre deuxième expérience, les forces moyennes ressenties se trouvent entre le niveau 3 et le niveau 6 de l'échelle de Beaufort. Nous considérons donc que la configuration utilisée peut servir à simuler les limites supérieures du comportement normal du vent en ville. Néanmoins, pour les valeurs inférieures (« 1-Très légère brise » et « 2-Légère brise ») le dispositif pourrait être complété avec des ventilateurs moins puissants. Nous considérons que le dispositif peut conserver la configuration de huit ventilateurs utilisée lors de nos expériences qui permet de restituer les degrés 3 et 6 de l'échelle de Beaufort en produisant un effet enveloppant sur le corps. Nous avons évalué uniquement la valeur minimale et maximale du dispositif, c'est pourquoi nous supposons qu'en utilisant les valeurs intermédiaires nous pouvons simuler les degrés 4 et 5 de

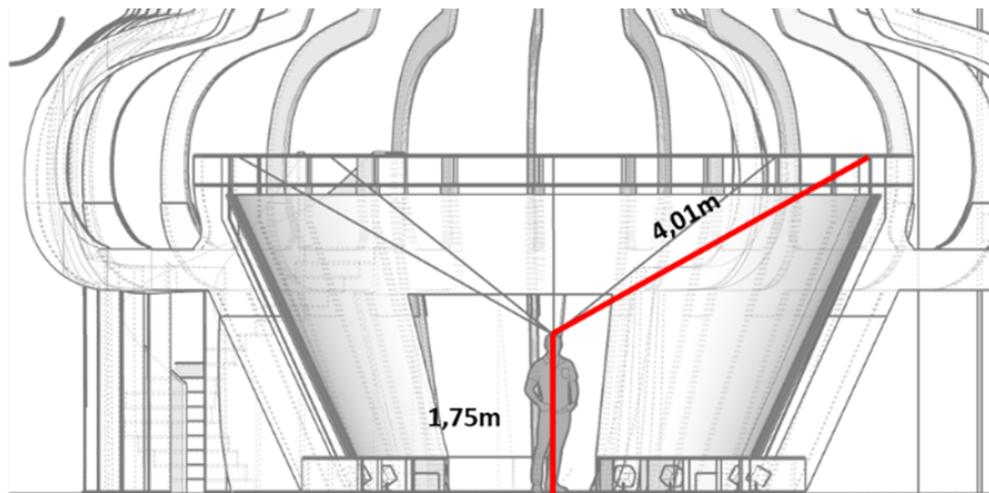
l'échelle. Enfin, nous pensons qu'un petit ventilateur localisé au niveau de la tête pourrait être mis en oeuvre afin de restituer la friction du vent sur le visage, même en situation aérodynamique calme, aux moments où le participant se déplace.

Une solution sans ventilateurs pourrait être imaginée en se basant sur un système d'injection d'air comprimé dans la salle d'expérimentation. Un tel système pourrait réduire la latence entre le moment où le ventilateur est allumé et le moment où le vent est perçu. Diminuer cette latence serait bénéfique pour pouvoir mieux exploiter l'interaction de l'utilisateur du dispositif dans la scène virtuelle.

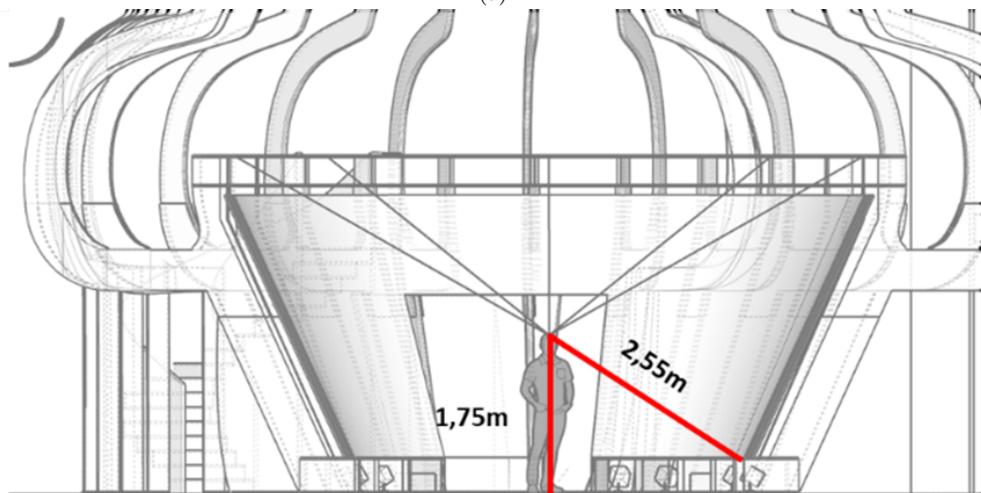
Nous avons choisi de localiser les ventilateurs au niveau du sol, à la différence de la configuration utilisée par VERLINDEN et al. (2013), pour deux raisons différentes. D'abord, lors de nos expériences les participants étaient invités à lever le regard pour voir les bâtiments, les nuages, et (dans le cas de notre première expérience) le comportement des *streamlines*. C'est pourquoi, placer les ventilateurs dans la partie inférieure de la salle d'expérimentation nous a semblé une bonne option, afin de réduire leur exposition visuelle qui aurait pu distraire les participants.

La deuxième raison est liée à la distance de localisation de ventilateurs. Nous avons initialement pensé à mettre en oeuvre nos expériences dans CORAULIS (AAU, p. d.). Cette plateforme immersive présente deux zones potentielles pour l'installation des ventilateurs. La première se trouve au-dessus de l'écran (voir la Figure 7.1a), au niveau de la passerelle périphérique, et la deuxième au niveau du sol, sous l'écran 360° et à côté des haut-parleurs (voir la Figure 7.1b). Avec un écran conique comme celui de CORAULIS, localiser les ventilateurs dans la partie supérieure impliquait de les éloigner plus des participants, ce qui avait un impact sur la force ressentie du vent et sur le temps nécessaire pour le percevoir. Nous avons donc décidé de placer les ventilateurs au niveau du sol, et de garder ainsi une configuration transposable entre la salle de réalité virtuelle utilisée pour les expériences et la plateforme immersive CORAULIS. Finalement, nous nous sommes concentrés uniquement sur les expériences dans la salle de réalité virtuelle car CORAULIS n'a pas été finalisé à temps.

Néanmoins, suite aux résultats de notre deuxième expérience, où nous avons trouvé une surestimation de la force du vent dans la scène virtuelle, nous pensons que le fait de recevoir le flux du vent depuis le bas de l'écran peut avoir un impact sur sa perception. Nous pensons notamment aux effets de l'incidence du vent sur les jambes des participants. Le vent, à cause des différentes obstructions sur son chemin, est de moins en moins perceptible à fur et à mesure que l'on se rapproche du sol. C'est pourquoi, le vent résul-



(a)



(b)

FIGURE 7.1 – Localisations possibles des ventilateurs dans CORAULIS (AAU, p. d.).

tant en ville présente généralement une plus faible incidence sur les jambes des piétons, comparativement à leur buste ou à leur tête. MOON et KIM (2004) ont dirigé leur niveau inférieur des ventilateurs vers la poitrine des participants, car d'après la calibration de leur dispositif, ceci était jugé comme plus naturel que le vent perçu sur les jambes. Nos ventilateurs situés au sol étaient dirigés vers la tête des participants, néanmoins à cause de leur taille, ils avaient aussi une incidence sur leurs torsos et leurs jambes. Il serait donc souhaitable de refaire notre deuxième expérience en localisant les ventilateurs en partie supérieure et en produisant peut-être des vents plus réalistes en terme de perception par rapport aux vents réellement perçus dans un espace urbain.

7.2.3 Écouteurs avec l'option d'annulation de bruit

Suivant le même principe que l'utilisation d'un écran de projection plutôt qu'un visiocasque RV, nous avons opté pour utiliser des écouteurs au lieu d'un casque audio afin d'éviter de masquer l'incidence du vent sur les oreilles des participants.

Même en utilisant la fonction d'annulation du bruit des écouteurs, il était toujours possible d'entendre certains des sons de la salle d'expérimentation. Cependant les participants n'ont pas remarqué de perturbations particulières liées aux sons extérieurs de la scène qui auraient pu les distraire ou leur donner des indices pour identifier la force ou la direction du vent.

Nous n'avons donc pas de problèmes particuliers liés à l'interface, mais nous avons différents questionnements par rapport aux sons restitués dans la scène virtuelle.

Pour notre première expérience, nous avons utilisé un enregistrement du vent variable en fonction de la force et de la direction du phénomène dans la scène virtuelle. Cette restitution était suggestive et elle ne cherchait pas à imiter les sons du vent en ville. Nous pouvons dire qu'elle était exagérée par rapport au type de situation, mais c'était notre intention afin de tenter de mieux faire comprendre les propriétés du vent, et de réduire les sons de la salle. Il existe des études de restitution du paysage sonore en réalité virtuelle, comme les travaux de PARDOEN (2020), qui reconstituent les ambiances d'une scène virtuelle à partir de différents sons. Nous pensons qu'une telle étude focalisée sur l'analyse des sons du vent en ville serait très intéressante pour modifier la perception de la force du phénomène.

Concernant notre deuxième expérience, nous avons utilisé une reproduction constante d'un bruit blanc lors des parcours dans la scène virtuelle. L'objectif était de compléter la fonction d'annulation de bruit des écouteurs pour réduire les sons de la salle d'ex-

périmentation. Néanmoins, d'après les retours des participants de l'expérience, ce son a parfois été compris comme lié au vent dans la scène. Cela a pu biaiser la perception des participants au moment d'évaluer la force perçue du vent (reflétée dans sa surestimation). C'est pourquoi nous considérons comme nécessaire de reproduire cette expérience avec un son différent, ou même sans restitution sonore, afin de tester si cette variable apporte une différence statistiquement significative par rapport à l'évaluation de la force du vent.

7.3 Potentiel dans la représentation des ambiances urbaines

Nous avons exploré une façon de restituer les résultats des simulations CFD d'un point de vue piéton dans une scène de réalité virtuelle afin d'exploiter les propriétés sensibles du vent.

Nous voyons ici un intérêt pour la représentation architecturale, un domaine où les représentations jouent un rôle important et qui cherchent de plus en plus à simuler la réalité. Nous faisons l'hypothèse que ce type de représentations, qui prennent en compte les ambiances du lieu, peut apporter des éléments complémentaires pour mieux percevoir et comprendre l'espace. Néanmoins, nous n'avons pas mis à l'épreuve cette hypothèse lors de notre recherche. Nous n'avons pas évalué l'incidence de ce type de représentations ni dans le processus de conception (du côté des professionnels), ni dans une étape de communication du projet (pour le grand public). Nous envisageons donc ces études comme perspective afin de mieux clarifier et définir les contributions de l'utilisation des représentations du vent en réalité virtuelle pour les différentes étapes de conception des projets.

D'un autre côté, le vent, en tant que phénomène physique, peut affecter la définition de l'ambiance d'un lieu ; néanmoins, il ne peut pas, par lui-même, la définir. Il existe d'autres facteurs physiques et sensibles qui, en interagissant, participent à l'ambiance. Il serait donc intéressant de faire interagir ces différents éléments et d'évaluer leurs effets sur la perception d'une ambiance urbaine à l'aide d'un environnement virtuel. Si nous revenons à la perception de la force du vent en réalité virtuelle, il y a d'autres facteurs, au-delà de la force même du flux d'air, qui pourraient la définir. Par exemple, en reprenant les travaux de VIGIER (2015) sur la suggestion des ambiances climatiques d'un lieu en RV, les tonalités et la saturation des couleurs, les contrastes, et la netteté de l'image peuvent évoquer différentes perceptions du lieu chez les spectateurs. Dans ce sens, nous supposons

que l'ajout du flux du vent dans une telle scène pourrait d'un côté affecter la perception de la scène et d'un autre côté être affecté par la scène. Par exemple, une scène contrastée avec des couleurs froides pourrait être perçue plus froide avec l'utilisation du flux du vent, et le vent pourrait être perçu plus fort qu'il ne l'est à cause du rendu visuel global de la scène.

Cette relation peut être retrouvée dans l'interaction avec d'autres phénomènes physiques. Si nous restons sur l'exemple de la force du vent, en pensant au son, nous faisons l'hypothèse que le vent pourrait être perçu plus ou moins fortement en fonction du son ajouté à la scène virtuelle. Un bruit fort et constant dans la scène qui suggère la présence du vent pourrait générer une surestimation de la force du vent perçu. C'est pourquoi, comme nous l'avons déjà indiqué plus avant, nous jugeons important de reproduire notre deuxième expérience sans restitution sonore, afin d'évaluer si la surestimation produite est liée au son présenté lors de l'évaluation.

En suivant la même idée, nous pouvons également penser à la température de la salle de simulation. Comme c'est un environnement fermé et contrôlé, il serait intéressant de manipuler les variations de température, comme dans l'exemple présenté par ERICKSON et al. (2019), et tester leur influence sur la perception de la force du vent dans la scène virtuelle. La même force du vent peut devenir un facteur agréable ou produire une gêne en fonction de la température de l'air qui pourrait être associé à une saison de l'année. Si nous reprenons le graphique de confort aérothermique de SZUCS (2005), présenté dans la section 1.2 (cf. Figure 1.6 page 28), nous pouvons dire qu'une vitesse de vent de $3m/s$ peut provoquer une situation d'inconfort thermique avec une température d'air inférieure à $4^{\circ}C$ à cause des pertes d'énergie résultantes par le phénomène de la convection. La même vitesse de vent peut faire qu'un corps gagne de la chaleur si la température de l'air est supérieure à $31.5^{\circ}C$, en générant ainsi une situation inconfortable. Si la température de l'air se situe entre $4^{\circ}C$ et $31.5^{\circ}C$, avec la même vitesse de vent ($3m/s$), la personne se trouvera dans le seuil de confort aérothermique.

KULKARNI et al. (2012) et même HEILIG (1961) avec le « Sensorama » ont cherché à introduire une suggestion des odeurs dans leurs dispositifs. Nous pensons que c'est une piste intéressante à explorer, en utilisant un système de ventilation qui aide à la propagation et dispersion des odeurs dans la salle d'expérimentation.

Finalement, nous évoquons la lumière dans la scène virtuelle. L'intensité lumineuse dans une scène virtuelle d'un environnement urbain suggère la présence d'une incidence solaire directe dans l'espace. TAHRANI et MOREAU (2008) ont réalisé une étude compa-

rative entre un parcours dans un espace réel et le même parcours simulé en RV ; ils ont analysé la perception résultant des interactions entre la lumière solaire, l'environnement bâti et le déplacement des participants. Nous faisons l'hypothèse que cette suggestion de la présence du soleil (associée à la température) dans l'espace, pourrait modifier la perception du flux du vent dans la scène virtuelle.

En conclusion, il est nécessaire d'analyser et comprendre le phénomène physique du vent « isolé » dans la scène virtuelle afin d'étudier la compréhension de ses propriétés et de ses différents effets sur la perception des personnes. Par ailleurs, en vue de simuler la restitution des ambiances d'un lieu à l'aide d'un environnement virtuel il faut garder en tête l'interaction avec d'autres phénomènes physiques et leurs effets sur la perception sensible des personnes. Nous reprenons l'idée exprimée par AUGOYARD (2011) dans le premier congrès international sur les ambiances urbaines :

« Fidèles à l'histoire du savoir occidental, pour mieux savoir, nous avons séparé, nous avons distingué. Et tout le problème maintenant, c'est de recoller les morceaux ; parce que de tel lieu vécu, il émanera à tel moment UNE ambiance globale » (p.20)

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre recherche est née de l'idée d'améliorer la représentation des ambiances pour la conception architecturale et urbaine. Nous nous sommes rapidement concentrés sur les représentations sensibles du vent dans les environnements urbains.

En nous basant sur les représentations existantes dans les champs de l'architecture et de l'urbanisme, où la représentation du vent est notamment caractérisée par la visualisation de son écoulement, nous nous sommes questionnés sur les manières d'augmenter ces représentations afin d'exprimer les propriétés sensibles du phénomène. Cela a étendu notre recherche vers d'autres disciplines et moyens d'expression, tels que les représentations artistiques, la synthèse d'images, le cinéma et la réalité virtuelle.

Nous avons trouvé dans ces domaines des expressions du vent différentes de celles utilisées dans les champs de l'architecture et de l'urbanisme. Ces représentations sont plus proches de notre façon de percevoir le vent dans la réalité. Elles se présentent sous forme audiovisuelle montrant les effets du vent sur les éléments du contexte, ainsi que sous forme tactile sur les personnes. Cela permet de transmettre une information sur le vent qui est comparable aux expériences vécues en réalité.

Nous avons choisi d'évaluer ces différents types d'expression dans un dispositif de réalité virtuelle équipé d'un groupe de ventilateurs commandés numériquement. En effet, ce dispositif permet de regrouper les représentations audiovisuelles et tactiles, ainsi que la visualisation d'éléments qui ne sont pas observables en réalité comme l'écoulement du vent, tout en immergeant les personnes dans un modèle 3D. Nous avons choisi d'analyser des scènes urbaines d'un point de vue piéton.

Dans ce dispositif nous avons mené à bien deux expériences différentes concernant la compréhension des propriétés du vent, ainsi que les effets du phénomène sur le sentiment de présence dans la scène virtuelle.

Lors de notre première expérience, Nous avons utilisé les résultats d'une simulation aérodynamique pour générer différents types de rendus du vent dans une scène virtuelle. Les résultats ont montré une compréhension correcte de l'information de la force et de la direction du vent par la stimulation du sens du toucher. Cela nous permet d'accepter notre première hypothèse générale exposée dans la section 4.3. Ces résultats montrent une

façon d'utiliser les données quantitatives résultant d'une simulation du vent en exploitant les propriétés sensibles du phénomène, même si le rendu physique de la force du vent n'était pas un vent réel (en termes de précision du flux envoyé) mais uniquement réaliste (voir le chapitre 5).

Nous avons évalué la compréhension des *streamlines* de l'écoulement du vent dans la scène virtuelle. Les résultats de cette représentation, bien qu'ils ne soient pas aussi performants que ceux de la restitution tactile pour la compréhension des propriétés du vent, sont meilleurs que ceux de la scène de référence.

Notre deuxième hypothèse générale concernait la visualisation de l'écoulement du vent en réalité virtuelle afin de nourrir le processus de conception architecturale et urbaine. Nos résultats montrent une meilleure compréhension des propriétés du vent avec cette visualisation, par comparaison avec la scène audiovisuelle de référence. Nous avons seulement évalué l'utilisation de *streamlines* dans la scène virtuelle, néanmoins nous mettons l'accent sur la nécessité d'une évaluation future avec d'autres types de visualisations des résultats CFD.

Les résultats de notre expérience ont montré que les conditions incluant la restitution tactile du vent présentent la plus forte augmentation du sentiment de présence dans la scène de réalité virtuelle évaluée, ce qui est cohérent avec les études précédentes de restitution tactile du vent en réalité virtuelle (LEHMANN et al., 2009; MOON et KIM, 2004; RIETZLER et al., 2017; VERLINDEN et al., 2013).

Notre deuxième expérience a montré une surestimation de la force du vent par rapport à l'échelle de Beaufort selon nos conditions expérimentales. Les résultats montrent aussi que la direction du vent latéral est plus difficile à identifier que la direction du vent de face ou de l'arrière. Cela est cohérent avec les résultats des évaluations de NAKANO et YANAGIDA (2017).

Avec notre configuration des ventilateurs, leurs tailles et puissances, il est possible de simuler le vent dans un espace public. Cette configuration produit un effet enveloppant du vent autour du corps des participants qui est cohérent avec les situations réelles.

À la suite de nos expériences, différents questionnements et perspectives ont été soulevés (cf. chapitre 7). Ils concernent le niveau de localisation des ventilateurs, le type d'affichage de la scène virtuelle, l'interaction du vent en RV avec d'autres phénomènes physiques afin de restituer l'ambiance d'un espace, entre autres.

Tout au long de cette recherche nous avons mis l'accent sur l'importance du vent dans les espaces habités et sur son incidence sur les habitants de ces espaces. Nos expériences

montrent l'intérêt de développer cette approche dans la représentation des différentes étapes du projet architectural et urbain. Ceci peut d'une part nourrir le processus de conception, en permettant aux professionnels du projet d'explorer les propriétés sensibles du vent, et d'autre part de permettre aux futurs usagers d'un espace de l'expérimenter et de l'apprécier au-delà de ses seuls aspects visuelles et esthétiques.

BIBLIOGRAPHIE

A

- AAU, (p. d.), CORAULIS – Centre d’Observation en Réalité Augmentée et Lieu d’Immersion Sonore | Contrat de recherche, Récupérée 6 juin 2018, à partir de <http://aau.archi.fr/contrat-de-recherche/coraulis-centre-dobservation-en-realite-augmentee-et-lieu-dimmersion-sonore/>
- AFNOR, (2005), Eurocode 1 : Actions sur les structures Partie 1-4 : Actions générales — Actions du vent.
- Angry Birds* [IMDb ID : tt2061577 event-location : Finland], (2009, décembre 10).
- ASHRAE, (2007), *ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2007*, Ventilation ; Acceptable Indoor Air Quality in Low-rise Residential Buildings. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating ; Air-Conditioning Engineers, Inc.
- AUGOYARD, J.-F., (2011), *Faire une ambiance*, A la croisée.

B

- BAKAY, B. & HEIDRICH, W., (2002), Real-Time Animated Grass, *Proceedings of Eurographics (short paper)*.
- BANSAL, N. K., MATHUR, R. & BHANDARI, M. S., (1993), Solar chimney for enhanced stack ventilation, Récupérée 11 mai 2018, à partir de <http://eprint.iitd.ac.in/handle/2074/2258>
- BARNIAUDY, C., (2018), *Aménager au gré des vents : la géographie au service de l’action*, Economica : Anthropos.
- BARR, M., (2016), Late Rain - Weymouth Street [Library Catalog : fineartamerica.com. Available at <https://fineartamerica.com/featured/late-rain-waymouth-street-mike-barr.html>], Récupérée 7 mai 2020, à partir de <https://fineartamerica.com/featured/late-rain-waymouth-street-mike-barr.html>

-
- BELGACEM, H., (2019), *Génération d'un « squelette informé » et application à l'étude aérodynamique de la forme urbaine / Thèse de doctorat CRENAU* (thèse de doct.), École Centrale de Nantes, Nantes.
- BERGER, M. & CRISTIE, V., (2015), CFD post-processing in Unity3D, *Procedia Computer Science*, 51, 2913-2922, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.476>
- BLOCKEN, B., STATHOPOULOS, T., CAMELIET, J. & HENSEN, J., (2009), *Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment*, IBPSA.
- BOTTICELLI, S., (1485), The birth of Venus.
- BRAMBILLA, A., CARNECKY, R., PEIKERT, R., VIOLA, I. & HAUSER, H., (2012), Illustrative Flow Visualization : State of the Art, Trends and Challenges, 75-94, <https://doi.org/10.2312/conf/EG2012/stars/075-094>
- BUERGER, K., FERSTL, F., THEISEL, H. & WESTERMANN, R., (2009), Interactive Streak Surface Visualization on the GPU, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15 6, 1259-1266, <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.154>
- BURGE, P. S., (2004), Sick building syndrome, *Occupational and Environmental Medicine*, 61, 185-190, Récupérée 12 mai 2018, à partir de <http://oem.bmj.com/content/61/2/185.short>
- BUSTAMANTE, C., JANS, M. & HIGUERAS, E., (2014), The behavior of wind in urban morphology and its incidence in the resting use of public space, Punta Arenas, Chile, (In Spanish), *AUS*, 15, 28-33, <https://doi.org/10.4206/aus.2014.n15-06>

C

- CARDIN, S., THALMANN, D. & VEXO, F., (2007), Head Mounted Wind, *proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007)*, 101-108, Récupérée 29 mai 2018, à partir de <https://infoscience.epfl.ch/record/104359>
- CHEN, C.-K., YAN, S., YU, H., MAX, N. & MA, K.-L., (2011), An Illustrative Visualization Framework for 3D Vector Fields, *Computer Graphics Forum*, 30 7, 1941-1951, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2011.02064.x>
- CHEVRET, P., (1994), *Simulation numérique des effets de la turbulence sur la propagation du son dans l'atmosphère*, Ecully, Ecole centrale de Lyon, Récupérée 18 mai 2018, à partir de <http://www.theses.fr/1994ECDL0018>

CHIAPPERO, M., (2002), *Le dessin d'urbanisme : de la carte au schéma-concept, construire les projets de villes et de territoires. Manuel à l'usage des urbanistes*, CERTU. Code du travail, (2008).

D

- DEVAL, J. & BERGER, X., (1983), Le confort en climat chaud, *Séminaire REXCOOP habitats climatiques, Laboratoire d'Ecothermie Solaire CNRS*, 28p.
- DIENER, J., RODRIGUEZ, M., BABOUD, L. & REVERET, L., (2009), Wind projection basis for real-time animation of trees, *Computer Graphics Forum*, 282, 533-540, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01393.x>
- DOBASHI, Y., KANEDA, K., YAMASHITA, H., OKITA, T. & NISHITA, T., (2000), A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds, *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 19-28, <https://doi.org/10.1145/344779.344795>
- DROZD, C., (2011), *Représentation langagières et iconographiques des ambiances architecturales : de l'intention d'ambiance à la perception sensible des usagers* (thèse de doct.), Ecole Centrale de Nantes, Nantes.

E

- ERICKSON, A., KIM, K., SCHUBERT, R., BRUDER, G. & WELCH, G., (2019), Is It Cold in Here or Is It Just Me? Analysis of Augmented Reality Temperature Visualization for Computer-Mediated Thermoception [ISSN : 1554-7868], *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 202-211, <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2019.000-2>

F

- FANGER, P. O., (1973), Assessment of man's thermal comfort in practice, *Occupational and Environmental Medicine*, 304, 313-324, <https://doi.org/10.1136/oem.30.4.313>
- FARRELLY, L., (2009), *Techniques de représentation*, Pyramyd.
- FAURE, X. & FLAMAND, O., (2009), *Etude du confort au vent autour du projet de la canopée des halles à Paris*.

-
- FIELD, A. & HOLE, G., (2003), *How to Design and Report Experiments*, SAGE Publications Ltd.
- FIELD, A. P., MILES, J. & FIELD, Z., (2012), *Discovering statistics using R / Andy Field, Jeremy Miles, Zoë Field.*, London ; Thousand Oaks, Calif. : Sage, Récupérée 24 février 2020, à partir de <http://repository.fue.edu.eg/xmlui/handle/123456789/2902>
- FU, D., WU, B., MORELAND, J., CHEN, G., REN, S. & ZHOU, C., (2009), Virtual Reality Visualization of Typical Processes in Blast Furnace.
- FUCHS, P., (1996), *Les interfaces de la réalité virtuelle*, éditeur AJIIMD, Récupérée 3 février 2021, à partir de <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00785588>
- FUCHS, P., MOREAU, G. & DONIKIAN, S., (2006a), *Le traité de la réalité virtuelle volume 1 – L’Homme et l’environnement virtuel* (Presses des Mines, T. 1).
- FUCHS, P., MOREAU, G. & DONIKIAN, S., (2006b), *Le traité de la réalité virtuelle Volume 2 – L’interfaçage, l’immersion et l’interaction en environnement virtuel* (Presses des Mines, T. 2), Récupérée 21 novembre 2017, à partir de <https://www.pressesdesmines.com/produit/le-traite-de-la-realite-virtuelle-volume-2-l-interfacage-l-immersion-et-l-interaction-en-environnement-virtuel/>
- FUCHS, P., MOREAU, G. & DONIKIAN, S., (2006c), *Le traité de la réalité virtuelle Volume 4 – Les applications de la réalité virtuelle* (Presses des Mines, T. 4), Récupérée 21 novembre 2017, à partir de <https://www.pressesdesmines.com/produit/le-traite-de-la-realite-virtuelle-volume-4-les-applications-de-la-realite-virtuelle/>

G

- GABRIEL, M. & GOLDBERG, E., (1995), Pocahontas [IMDb ID : tt0114148], Récupérée 19 avril 2018, à partir de <http://www.imdb.com/title/tt0114148/>
- GANDEMER, J., (1978), *Discomfort due to wind near buildings : aerodynamic concepts*, Dept. of Commerce, National Bureau of Standards : For sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off., Récupérée 6 mai 2020, à partir de <https://catalog.hathitrust.org/Record/007291683>
- GANDEMER, J., (1992), *Guide sur la climatisation naturelle de l’habitat en climat tropical humide. Tome 1 : méthodologie de prise en compte des paramètres climatiques dans l’habitat et conseils pratiques*, CSTB.

-
- GANDEMER, J., (1994), *Le vent autour des constructions : Anomalies aérodynamiques et dispositifs de correction. Ventilation en climat tropical humide*, Université de Nantes Ecole d'architecture de Nantes.
- GILLET, B., (1933), Les trois petits cochons [original-title : Three Little Pigs IMDb ID : tt0024660], Récupérée 19 avril 2018, à partir de <http://www.imdb.com/title/tt0024660/>
- GIRALDO, G., SERVIÈRES, M. & MOREAU, G., (2020), Perception of Multisensory Wind Representation in Virtual Reality [ISSN : 1554-7868], *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 45-53, <https://doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00024>
- GIRALDO, G., SERVIÈRES, M., TOURRE, V., SIGNORELLI, V. & BONNET, A., (2018), Caractérisation et restitution vidéographique des ambiances urbaines, *SCAN'18*, 47, <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701012>

H

- HALL, E. T., (1969), *The hidden dimension*, Garden City, N.Y : Anchor Books.
- HEILIG, M., (1961), *Sensorama simulator*, Récupérée 21 novembre 2018, à partir de <https://patents.google.com/patent/US3050870A/en>
- HÖPPE, P., (1999), *An universal index for the assessment of the thermal environment - the physiological equivalent temperature PET*, World Meteorological Organization.
- HOSOKAWA, M., FUKUDA, T., YABUKI, N., MICHIKAWA, T. & MOTAMEDI, A., (2016), INTEGRATING CFD AND VR FOR INDOOR THERMAL ENVIRONMENT DESIGN FEEDBACK.
- HOST, S. & TELLE-LAMBERTON, M., (2014), Le milieu urbain, réceptacle de nuisances multiples. *Territoires, incubateurs de santé ?*, IAU Institut d'aménagement et d'urbanisme Ile de France.
- HUMMEL, M., GARTH, C., HAMANN, B., HAGEN, H. & JOY, K. I., (2010), IRIS : Illustrative Rendering for Integral Surfaces, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16 6, 1319-1328, <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.173>

I

ITO, K., BAN, Y. & WARISAWA, S., (2019), AlteredWind : Manipulating Perceived Direction of the Wind by Cross-Modal Presentation of Visual, Audio and Wind Stimuli, *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, 3-4, <https://doi.org/10.1145/3355049.3360525>

K

KAHRS, J., (2012), Paperman [IMDb ID : tt2388725], Récupérée 19 avril 2018, à partir de <http://www.imdb.com/title/tt2388725/>

KASTEN, J., REININGHAUS, J., HOTZ, I. & HEGE, H. C., (2011), Two-Dimensional Time-Dependent Vortex Regions Based on the Acceleration Magnitude, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1712, 2080-2087, <https://doi.org/10.1109/TVCG.2011.249>

KIRBY, R. M., MARMANIS, H. & LAIDLAW, D. H., (1999), Visualizing Multivalued Data from 2D Incompressible Flows Using Concepts from Painting, *Proceedings of the Conference on Visualization '99 : Celebrating Ten Years*, 333-340, Récupérée 20 avril 2018, à partir de <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=319351.319429>

KOJIMA, Y., HASHIMOTO, Y. & KAJIMOTO, H., (2009), A Novel Wearable Device to Present Localized Sensation of Wind, *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, 61-65, <https://doi.org/10.1145/1690388.1690399>

KULKARNI, S., MINOR, M., DEEVER, M., PARDYJAK, E. & M. HOLLERBACH, J., (2012), Design, Sensing, and Control of a Scaled Wind Tunnel for Atmospheric Display, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 17, 1-11, <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2113353>

L

LAMBERTS, R., DUTRA, L. & PEREIRA, F. O. R., (2014), *Eficiência Energética na Arquitetura* (3^a edição), ELETROBRAS/PROCEL.

-
- LARAMEE, R. S., WEISKOPF, D., SCHNEIDER, J. & HAUSER, H., (2004), Investigating swirl and tumble flow with a comparison of visualization techniques, *IEEE Visualization 2004*, 51-58, <https://doi.org/10.1109/VISUAL.2004.59>
- LAROUSSE, É., (p. d.), Définitions : vent - Dictionnaire de français Larousse, Récupérée 4 mai 2018, à partir de <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/vent/81414>
- LAVALLE, S., (2017), *Virtual Reality*, Cambridge University Press, Récupérée 27 janvier 2021, à partir de <http://lavalle.pl/vr/>
- LECORRE, Y., (1998), *De la mise en évidence de l'incidence des facteurs microclimatiques sur la perception du piéton en milieu urbain : aspects méthodologiques* (thèse de doct.), EA Nantes ISITEM EA Grenoble, Nantes Grenoble.
- LEHMANN, A., GEIGER, C., WOLDECKE, B. & STOCKLEIN, J., (2009), Poster : Design and evaluation of 3D content with wind output, *2009 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 151-152, <https://doi.org/10.1109/3DUI.2009.4811231>
- LEVY, A., (2014), Urbanisme et santé : les trois révolutions. *Territoires, incubateurs de santé ?*, IAU Institut d'aménagement et d'urbanisme Ile de France.

M

- MAX, N., CRAWFIS, R. & WILLIAMS, D., (1992), Visualizing Wind Velocities by Advecting Cloud Textures, *Proceedings of the 3rd Conference on Visualization '92*, 179-184, Récupérée 28 mai 2018, à partir de <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=949685.949719>
- MEEHAN, M., LASTRA, R. D. A., DR, R., MCMURRAY, R., MEEHAN, M. J. & MEEHAN, M. J., (2001), *Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments. Doctoral Dissertation.*
- MÉTÉO-FRANCE, (p. d.), Vent, Récupérée 18 mai 2018, à partir de <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/parametres-observees/vent>
- MILGRAM, P. & KISHINO, F., (1994), A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, *IEICE Trans. Information Systems, vol. E77-D, no. 12*, 1321-1329.
- MIYAMOTO, S., (1981, juillet 9), *Donkey Kong* [IMDb ID : tt0176664 event-location : Japan].
- MOLONEY, J., (2009), Temporal context and concurrent evaluation. *Mixed Reality In Architecture, Design and Construction* (p. 135-153), Springer.

MOON, T. & KIM, G. J., (2004), Design and Evaluation of a Wind Display for Virtual Reality, *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 122-128, <https://doi.org/10.1145/1077534.1077558>

N

NAKANO, T. & YANAGIDA, Y., (2017), Conditions influencing perception of wind direction by the head, *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, 229-230, <https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892260>

NAKANO, T., YOSHIOKA, Y. & YANAGIDA, Y., (2014), Effects of Wind Source Configuration of Wind Displays on Property of Wind Direction Perception. *ACHI 2014 : The Seventh International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*.

P

PAES, D., ARANTES, E. & IRIZARRY, J., (2017), Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models : Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems, *Automation in Construction*, 84, 292-303, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.016>

PARDOEN, M., (2020), « Bretez II » et l'archéologie du paysage sonore : la restitution sensorielle [Number : 42 Publisher : Ministère de la culture et de la communication, direction générale des patrimoines], *In Situ. Revue des patrimoines*, 42, <https://doi.org/10.4000/insitu.27668>

PÉNEAU, J.-P., (1996), Des densités aux rugosités. Les modalités instrumentales d'une transposition. *Les Annales de la Recherche Urbaine* n°67, 1995, 128-134., *Cybergeo : European Journal of Geography*, <https://doi.org/10.4000/cybergeo.301>

PLUIJMS, J. P., CAÑAL-BRULAND, R., BERGMANN TIEST, W. M., MULDER, F. A. & SAVELSBERGH, G. J. P., (2015), Expertise effects in cutaneous wind perception, *Attention, Perception & Psychophysics*, 776, 2121-2133, <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0893-6>

POST, F. H., VROLIJK, B., HAUSER, H., LARAMEE, R. S. & DOLEISCH, H., (2004), The State of the Art in Flow Visualisation : Feature Extraction and Tracking, *Computer Graphics Forum*, 224, 775-792, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2003.00723.x>

Q

QUIGLEY, E., YU, Y., HUANG, J., LIN, W. & FEDKIW, R., (2018), Real-Time Interactive Tree Animation, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24 5, 1717-1727, <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2661308>

R

REGNAULT-BOUSQUET, C., (2001), *Les représentations visuelles des phénomènes sonores : Application à l'urbanisme* (thèse de doct.).

RIETZLER, M., PLAUMANN, K., KRÄNZLE, T., ERATH, M., STAHL, A. & RUKZIO, E., (2017), VaiR : Simulating 3D Airflows in Virtual Reality, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 5669-5677, <https://doi.org/10.1145/3025453.3026009>

RISTIC, S., (2007), Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I – Non optical Methods, *Scientific Technical Review LVII N., 1*.

S

SACRÉ, C. & GANDEMER, J., (1993), Caractérisation microclimatique des espaces extérieurs : Du point de vue du vent et de la température, Récupérée 20 mai 2018, à partir de http://www.persee.fr/doc/aru_0180-930x_1993_num_61_1_1765

SALZBRUNN, T., GARTH, C., SCHEUERMANN, G. & MEYER, J., (2008), Pathline predicates and unsteady flow structures, *The Visual Computer*, 24, 1039-1051, <https://doi.org/10.1007/s00371-007-0204-x>

SALZBRUNN, T., JANICKE, H., WISCHGOLL, T. & SCHEUERMANN, G., (2008), The State of the Art in Flow Visualization : Partition-Based Techniques, *Proceedings of the 2008 Simulation and Visualization Conference*, 75-92, <https://corescholar.libraries.wright.edu/cse/332>

SALZBRUNN, T. & SCHEUERMANN, G., (2007), Streamline Predicates as Flow Topology Generalization. *Topology-based Methods in Visualization* (p. 65-77), Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-540-70823-0_5

SHYAMALAN, M. N., (2008), The Happening [IMDb ID : tt0949731], Récupérée 19 avril 2018, à partir de <http://www.imdb.com/title/tt0949731/>

-
- SLATER, M., MCCARTHY, J. & MARINGELLI, F., (1998), The Influence of Body Movement on Subjective Presence in Virtual Environments, *Human Factors*, 40 3, 469-477, <https://doi.org/10.1518/001872098779591368>
- SØRENSEN, P., (2009), Wind and ventilation. *Climate and architecture* (p. 91-114), Routledge.
- STAM, J., FEDKIW, R., STAMY, J. & JENSENZ, H. W., (2001), HW. Visual simulation of smoke, *In : Proceedings of the SIGGRAPH'01*, 15-22.
- STOLL, C., GUMHOLD, S. & SEIDEL, H. P., (2005), Visualization with stylized line primitives, *VIS 05. IEEE Visualization, 2005.*, 695-702, <https://doi.org/10.1109/VISUAL.2005.1532859>
- SUTHERLAND, I. E., (1968), A head-mounted three dimensional display, *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*, 757-764, <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>
- SVAKHINE, N. A., JANG, Y., EBERT, D. & GAITHER, K., (2005), Illustration and photography inspired visualization of flows and volumes, *VIS 05. IEEE Visualization, 2005.*, 687-694, <https://doi.org/10.1109/VISUAL.2005.1532858>
- SZUCS, A., (2005), *Caractérisations des ambiances des stades modernes du point de vue du confort aérothermique des spectateurs contribution à l'approche multicritères du confort aérothermique, visuel et acoustique* (thèse de doct.), Université de La Rochelle, Récupérée 15 mars 2018, à partir de <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00348620/document>

T

- TAHRANI, S. & MOREAU, G., (2008), Integration of Immersive Walking to Analyse Urban Daylighting Ambiances [Publisher : Routledge], *Journal of Urban Design*, 13 1, 99-123, <https://doi.org/10.1080/13574800701803506>
- THOMAS, R., BALEZ, S., BERUBE, G. & BONNET, A., (2010), *L'aseptisation des ambiances piétonnes au XXIe siècle : entre passivité et plasticité des corps en marche*, CRESSON, <http://www.marcheenville.ufba.br/la%20recherche.htm>
- TIXIER, N., (2016, octobre 1), Le transect urbain. Pour une écriture corrélée des ambiances et de l'environnement.

U

- UBISOFT, (2020), *Assassin's Creed Valhalla pour Xbox Series X/S, PS5, PC et plus |*. Récupérée 6 mai 2021, à partir de <https://www.ubisoft.com/fr-fr/game/assassins-creed/valhalla>
- UNSELD, S., (2013), The Blue Umbrella [IMDb ID : tt2616880], Récupérée 19 avril 2018, à partir de <http://www.imdb.com/title/tt2616880/>

V

- VENTUSKY, (p. d.), Cartes de prévision météo, Récupérée 23 mai 2018, à partir de <https://www.ventusky.com>
- VERLINDEN, J. C., MULDER, F. A., VERGEEST, J. S., de JONGE, A., KRUTIY, D., NAGY, Z., LOGEMAN, B. J. & SCHOUTEN, P., (2013), Enhancement of Presence in a Virtual Sailing Environment through Localized Wind Simulation, *Procedia Engineering*, 60, 435-441, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.07.050>
- VIGIER, T., (2015), *Suggestion et perception des ambiances climatiques dans les environnements virtuels urbains* (thèse de doct.), Ecole Centrale de Nantes (ECN), Nantes.
- VIGIER, T., SIRET, D., MOREAU, G. & LESCOP, L., (2013), *Sensitive suggestion and perception of climatic effects in virtual urban environments*, ACM Symposium on Applied Perception.
- VirWind, (p. d.), Récupérée 22 novembre 2018, à partir de <https://www.kickstarter.com/projects/699770549/virwind-add-wind-to-your-virtual-reality-experienc?ref=discovery>

W

- WANG, C., WANG, Z., XIA, T. & PENG, Q., (2006), Real-time snowing simulation, *The Visual Computer*, 225, 315-323, <https://doi.org/10.1007/s00371-006-0012-8>
- WEI, X., ZHAO, Y., FAN, Z., LI, W., YOAKUM-STOVER, S. & KAUFMAN, A., (2003), Blowing in the Wind, *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 75-85, Récupérée 29 mai 2018, à partir de <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=846276.846287>

WIDERA, B., (2014, décembre 16), *Bioclimatic architecture as an opportunity for developing countries*, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2162.5768>

WIEDERHOLD, B., JANG, D. P., KANEDA, M., CABRAL, I., LURIE, Y., KIM, I., WIEDERHOLD, M. & KIM, S., (2001), An Investigation into Physiological Responses in Virtual Environments : An Objective Measurement of Presence.

Y

YAN, J., KENSEK, K., KONIS, K. & NOBLE, D., (2020), CFD visualization in a virtual reality environment using building information modeling tools [Number : 12 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute], *Buildings*, 10 12, 229, <https://doi.org/10.3390/buildings10120229>

Z

ZephVR, (p. d.), Récupérée 22 novembre 2018, à partir de <https://www.kickstarter.com/projects/1089532524/zephvr-real-wind-for-virtual-reality?ref=383838&token=66594723>

TABLE DES FIGURES

1.1	Vitesse du vent indicative par la manche à air (MÉTÉO-FRANCE, p. d.) . . .	20
1.2	(a) tirage thermique (<i>Stack effect</i>) et (b) ventilation croisée (SØRENSEN, 2009 cité par WIDERA, 2014)	22
1.3	Schéma des stratégies de masque solaire et de ventilation naturelle pour le contrôle du confort thermique en climat tropical humide (GANDEMER, 1992).	23
1.4	Difficultés à marcher dues aux effets mécaniques du vent (SACRÉ et GANDEMER, 1993).	24
1.5	Représentation visuelle de quelques effets aérodynamiques types, basés sur GANDEMER (1994).	26
1.6	Zone de confort aérothermique (SZUCS, 2005).	28
1.7	Schéma des principes des stratégies bioclimatiques (TUNDREA et BUDESCU, 2013).	30
1.8	Principe de ventilation du <i>Centre for Sustainable Energy Technologies</i> (CSET, 2006-2008, Ningbo, China), pour <i>MCA, environmental strategies</i> , cité par WIDERA (2014).	31
1.9	(a) Représentation qualitative et (b) quantitative de la simulation d'éclairage d'un espace. Source image : http://www.greenbim-eng.com	33
1.10	Dispositions de pressions sur une maison (GANDEMER, 1992).	35
1.11	Rayons acoustiques en présence de gradients de température (a) positif (b) négatif (CHEVRET, 1994).	36
2.1	Visualisation du vent par un effet de flou, incidence sur les piétons (a) photographie (BLOCKEN et al., 2009); (b) peinture (BARR, 2016).	42
2.2	Influence et direction du vent sur la neige (WANG et al., 2006).	43
2.3	Dispersion et déplacement de nuages (DOBASHI et al., 2000).	43
2.4	Déplacement des nuages pour indiquer l'influence et la direction du vent (VIGIER, 2015).	44

2.5	Animation de la pelouse en fonction de l'incidence du vent (BAKAY et HEIDRICH, 2002). Les lignes bleues représentent la direction indicative du flux du vent.	45
2.6	Des exemples de la déformation d'un arbre en fonction de l'incidence du vent (DIENER et al., 2009). La ligne bleue représente la direction indicative du flux du vent.	45
2.7	Incidence du vent sur un arbre (QUIGLEY et al., 2018).	46
2.8	Des effets du vent sur des bulles de savon (WEI et al., 2003).	46
2.9	Évolution de la fumée autour d'une sphère (STAM et al., 2001).	47
2.10	Incidence du vent, film « Phénomènes » (SHYAMALAN, 2008).	48
2.11	Court-métrage « Le parapluie bleu » (UNSELD, 2013).	48
2.12	Court-métrage les « Les avions de papier » (KAHRS, 2012).	49
2.13	La naissance de Vénus (extrait) (BOTTICELLI, 1485).	50
2.14	(a) The colors of the wind, film Pocahontas (GABRIEL et GOLDBERG, 1995). (b) Film les Trois Petits Cochons (GILLET, 1933).	50
2.15	Exemple de schémas de ventilation. Projet « AGORA Bogotá : Centro de Convenciones ». Élaborés par l'auteur au bureau d'études « Arquitectura & Bioclimática, Colombie ».	52
2.16	Représentation de l'incidence des phénomènes physiques sur les bâtiments, (a) vent et soleil en coupe et (b) incidence du vent en perspective (LAMBERTS et al., 2014).	53
2.17	Principe de la ventilation croisée (LAMBERTS et al., 2014).	53
2.18	Principes de conception pour profiter des effets du vent (GANDEMER, 1992).	54
2.19	Représentation des ambiances d'un lieu dans une coupe (TIXIER, 2016).	55
2.20	Schéma indicatif des tourbillons dans l'espace urbain (BUSTAMANTE et al., 2014).	56
2.21	Visualisations du comportement aérodynamique par injection de fumée (FAURE et FLAMAND, 2009).	57
2.22	Visualisation dans le tunnel de fumée de l'Onera (RISTIC, 2007).	58
2.23	Visualisation de l'écoulement tourbillonnaire par l'utilisation de fumée et de lasers. (RISTIC, 2007).	58
2.24	Visualisation de l'écoulement du vent à l'aide de liquides et colorants (RISTIC, 2007).	59

2.25	Exemples des méthodes de visualisation 2D : (a) <i>Direct visualization – colors</i> (b) <i>Direct visualization – arrows</i> (c) <i>Textured-based visualization</i> (d) <i>geometric visualization</i> . (LARAMEE et al., 2004).	61
2.26	Exemples de méthodes de visualisation 3D : (a) <i>Direct visualization – arrows</i> (b) <i>geometric visualization</i> (c) <i>Textured-based visualization on a isosurface</i> (d) <i>geometric visualization streamlines and an isosurface</i> (LARAMEE et al., 2004).	61
2.27	(a) Assemblage des vecteurs vers (b) une zone des vecteurs moyens (SALZBRUNN, JANICKE et al., 2008).	62
2.28	Exemples de la méthode <i>Integral-lined based</i> : (a) <i>Streamlines predicates</i> (SALZBRUNN et SCHEUERMANN, 2007) and (b) <i>pathlines predicates</i> (SALZBRUNN, GARTH et al., 2008) cités par SALZBRUNN, JANICKE et al. (2008).	63
2.29	(a) visualisation 2D du comportement du fluide (KIRBY et al., 1999) (b) Colorations pour exprimer les données de température résultantes de la simulation d’une plaque de cuisson. Le magenta représente la zone la plus chaude (la plaque) et le bleu l’air plus frais (SVAKHINE et al., 2005) (SALZBRUNN, GARTH et al., 2008).	64
2.30	(a) Rendu avec illumination, coloration et texture indicative de la direction (STOLL et al., 2005) (b) Comparaison visualisation traditionnelle et illustrative (CHEN et al., 2011). Visualisation du fluide avec des transparences (c) (HUMMEL et al., 2010).	65
2.31	<i>Streak surfaces</i> (BUERGER et al., 2009).	65
2.32	Synthèse d’un tourbillon (KASTEN et al., 2011).	66
2.33	Résultats des simulations aérauliques superposées aux images réelles (GIRALDO et al., 2018).	67
2.34	Animation du résultat d’une simulation CDF en réalité virtuelle (BERGER et CRISTIE, 2015).	68
2.35	Carte de vent dynamique (VENTUSKY, p. d.).	69
3.1	Schéma de la boucle «perception, cognition, action» (FUCHS et al., 2006a).	74
3.2	Quelques visualisations de jeux de vidéo (a) <i>Donkey Kong</i> (MIYAMOTO, 1981), (b) <i>Doom</i> (id SOFTWARE, 1993), (c) <i>Assassin’s Creed</i> (UBISOFT, 2020), (d) <i>Angry Birds</i> (« Angry Birds », 2009).	76
3.3	Schéma anthropocentrique de la perception de l’environnement virtuel (FUCHS et al., 2006a).	77

3.4	L’ambiance architecturale et urbaine (FUCHS et al., 2006c).	82
3.5	Suggestion des ambiances lumineuses (TAHRANI et MOREAU, 2008) (a) morphologie modèle 3D, (b) volumétrie avec de la lumière, (c) texture photo-réaliste, (d) photographie de l’espace réel.	82
3.6	Visualisation CFD dans une scène de RV (YAN et al., 2020).	83
3.7	Participant explorant un espace intérieur avec l’écoulement du vent à l’aide d’un <i>Head-mounted display</i> (HMD) (YAN et al., 2020).	84
3.8	Participant analysant le résultat d’une simulation CFD avec un écran de projection (FU et al., 2009).	84
3.9	Différents exemples de visualisations de résultats CFD dans une scène de RV (HOSOKAWA et al., 2016).	84
3.10	Sensorama, (a) schéma (HEILIG, 1961) et (b) photographie, extraite de l’URL suivante : https://en.wikipedia.org/wiki/Sensorama	85
3.11	<i>WindCube</i> (MOON et KIM, 2004).	86
3.12	<i>Head Mounted Wind</i> (CARDIN et al., 2007).	87
3.13	Comparaison entre des ventilateurs localisés en face de l’utilisateur et des ventilateurs sur le casque (LEHMANN et al., 2009).	87
3.14	Casque adapté avec des hautparleurs et ventilateurs (KOJIMA et al., 2009).	88
3.15	Dispositif VAir (RIETZLER et al., 2017).	89
3.16	Groupe de ventilateurs pour évaluer la perception de la direction du vent (NAKANO et YANAGIDA, 2017).	89
3.17	Dispositif de restitution de vent de VERLINDEN et al. (2013).	90
3.18	Évaluation de la direction du vent pour les marins (PLUIJMS et al., 2015).	90
3.19	Restitution tactile et audiovisuelle du vent (ITO et al., 2019).	91
3.20	Soufflerie à échelle (KULKARNI et al., 2012).	91
3.21	Dispositif de restitution du vent amBX (« amBX », p. d.).	92
3.22	Dispositifs (a) « VirWind » (p. d.) et (b) « ZephVR » (p. d.)	92
4.1	Localisation des ventilateurs dans la salle d’expérimentation (a) plan et (b) photographie de l’installation (GIRALDO et al., 2020).	102
4.2	Anémomètre <i>kimo vt200</i> utilisé pour les mesures de la vitesse du vent des ventilateurs.	103
4.3	Coupe de la localisation des ventilateurs dans la salle d’expérimentation.	104
4.4	Vitesses moyennes globales du ventilateur <i>ProBreeze 20"</i> à la localisation du participant.	104

4.5	(a) Boîtier de boutons du ventilateur avant modification, (b) modification du réglage du ventilateur et (c) connexion au module relais et la carte <i>Velleman-VMA101</i>	105
4.6	Schéma conceptuel du fonctionnement du relais. (I) Contact normalement ouvert (contact lié au contact commun si le relais est désactivé), (II) contact commun (II) contact normalement fermé (contact lié au contact commun si le relais est activé).	106
4.7	Schéma de connexions de trois relais pour le fonctionnement d'un ventilateur. Le courant arrive par le fil noir et il est dirigé à travers les relais pour activer la première vitesse (fil bleu), la deuxième (fil marron) et la troisième (fil rouge).	107
4.8	Module relais et carte <i>Velleman-VMA101</i> connectés aux ventilateurs.	107
5.1	(a) Quartier de la Porte Dauphine et (b) délimitation de la zone simulée (https://maps.google.fr).	112
5.2	Maquette numérique avant la simplification. Perspective surplombante et perspective d'un point de vue immergé.	113
5.3	Maquette numérique après la simplification (utilisée pour le calcul aérodynamique). Perspective surplombante et perspective du point de vue du piéton.	113
5.4	Visualisation des résultats CFD : (a) Vitesse du vent en coupe horizontale. (b) <i>Streamlines</i> de la vitesse du vent dans la rue d'intérêt de la maquette 3D (GIRALDO et al., 2020).	114
5.5	Champ de vecteurs tracé sur la rue virtuelle étudiée.	116
5.6	Représentation schématique de l'octogone virtuel (GIRALDO et al., 2020). (a) Identification des vecteurs traversant l'un des côtés de l'extérieur vers l'intérieur. (b) Vecteur moyen (en jaune) de la vitesse et direction du vent projeté sur l'axe du ventilateur (flèches noires).	116
5.7	Esquisse d'une visualisation du vent d'un point de vue immergé. (a) Visualisation du flux du vent à l'aide des surfaces et (b) à l'aide de <i>streamlines</i> (GIRALDO et al., 2020).	117
5.8	(a) Scène de référence, premier parcours présenté aux participants. (b) Participant dans la scène virtuelle avec la représentation visuelle du flux du vent.	118
5.9	Parcours prédéfinis pour évaluer les conditions expérimentales.	120
5.10	Écran d'évaluation de la force et de la direction du vent.	121

5.11	<i>Box plot</i> et <i>violin plot</i> de la racine carrée de l'erreur d'estimation de la direction du vent à travers les quatre différentes représentations. Le point rouge représente la valeur moyenne. Les lignes horizontales représentent les quartiles. La ligne horizontale en gras est la médiane. Le <i>violin plot</i> montre la distribution des réponses pour chaque condition. Pour chaque graphique, les étoiles présentent le niveau de signification (* = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$).	123
5.12	<i>Box plot</i> et <i>violin plot</i> de la racine carrée de l'erreur absolue de la force du vent à travers les quatre différentes représentations.	124
5.13	<i>Box plot</i> et <i>violin plot</i> de la racine carrée du sentiment de présence moyen à travers les quatre différentes représentations. Plus la valeur est élevée, plus le sentiment de présence est élevé.	125
6.1	Quartier Centre-Ville de Nantes (délimité en rouge) et zone de la maquette numérique utilisée (délimitée en noir). Image de https://maps.google.fr modifié.	132
6.2	Rues utilisées pour les parcours lors de l'évaluation des conditions (https://www.bing.com/maps).	132
6.3	Vue surplombante du modèle 3D, avec le début et la direction des différents parcours. Source du modèle 3D : Nantes Métropole (2014).	133
6.4	Vue immergée de chaque début de parcours et leurs directions dans le modèle 3D.	134
6.5	Condition minimale et maximale de la force du vent.	135
6.6	Modèle 3D avec et sans nuages (suggestion visuelle de la présence du vent).	136
6.7	Localisation des participants lors de l'expérience.	139
6.8	Écran d'évaluation de la force du vent basé sur l'échelle de Beaufort.	139
6.9	Écran d'évaluation de la direction du vent.	140
6.10	<i>Box plot</i> et <i>violin plot</i> des réponses de la force du vent selon les différentes conditions. Le point rouge correspond à la valeur moyenne. Les lignes horizontales représentent les quartiles. La ligne horizontale en gras est la médiane. Le <i>violin plot</i> montre la distribution des réponses pour chaque condition.	141

6.11	<i>Box plot</i> et <i>violin plot</i> de l'écart de la force du vent selon les différentes conditions. La valeur 0 (ligne pointillée) correspond à la valeur envoyée. Note : afin de faciliter la lecture du graphique, les relations des différences statistiques entre les conditions sont présentées dans le Tableau 6.3.	142
6.12	<i>Box plot</i> et <i>violin plot</i> de l'écart (par rapport aux valeurs envoyés) des réponses de la direction du vent selon les différentes conditions. La valeur 0 (ligne pointillée) correspond à la valeur envoyée.	143
6.13	<i>Box plot</i> et <i>violin plot</i> de la racine carrée des valeurs absolues de l'écart de la direction du vent selon les différentes conditions. La valeur 0 (ligne pointillée) correspond à la valeur envoyée. Note : afin de faciliter la lecture du graphique, les relations des différences statistiques entre les conditions sont présentées dans le Tableau 6.4.	144
7.1	Localisations possibles des ventilateurs dans CORAULIS (AAU, p. d.). . .	159

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Échelle de Beaufort - Effets observables sur terre. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Échelle_de_Beaufort)	27
1.2	Fréquences de gêne maximales admissibles en fonction des types d'activités (FAURE et FLAMAND (2009)).	28
2.1	Synthèse des rendus suggestifs des effets mécaniques du vent.	50
2.2	Classification des techniques de visualisation de fluides (SALZBRUNN, JANICKE et al., 2008).	60
2.3	Synthèse des rendus scientifiques du vent.	66
4.1	Vitesse globale moyenne et écart type avec le ventilateur <i>ProBreeze 20"</i> à la localisation de l'utilisateur.	103
6.1	Conditions expérimentales de la deuxième expérience. Elles ont été présentées de façon aléatoire aux participants.	135
6.2	Tableau des valeurs de référence de l'échelle de Beaufort utilisé pour l'évaluation.	138
6.3	Tableau des différences statistiquement significatives concernant l'écart (différence entre la valeur envoyée et la valeur perçue) de la force du vent. Les étoiles représentent le niveau de signification (* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$).	142
6.4	Tableau des différences statistiquement significatives concernant la racine carrée des valeurs absolues de l'écart (différence entre la valeur envoyée et la valeur perçue) de la direction du vent. Les étoiles représentent le niveau de signification (* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$).	144

Titre : Vers une représentation sensible du vent à l'aide d'un environnement virtuel.

Mot clés : Représentations du vent - Perception du vent - Étude Utilisateur - Réalité virtuelle - Ambiances urbaines.

Résumé : Le vent joue un rôle important dans différentes disciplines, parmi lesquelles l'ingénierie, l'architecture et l'urbanisme. Ses représentations dans ces champs sont principalement visuelles. Elles permettent de comprendre l'influence du phénomène sur le projet. Néanmoins nous pensons qu'elles peuvent être réductrices de sa dimension sensible. Cette dimension peut être mieux identifiée par d'autres moyens d'expression, tel que la peinture et le cinéma. En plus de ces représentations visuelles et audiovisuelles, il existe aussi des questionnements sur la restitution tactile du vent au moyen de la réalité virtuelle.

Notre thèse a pour objectif d'explorer ces différents modes de représentation du vent qui peuvent transmettre une intention d'ambiance. Nous avons utilisé pour ce faire une plateforme de réalité vir-

tuelle dans laquelle nous avons adapté un système de ventilateurs commandés numériquement depuis la scène virtuelle. Nous y avons évalué la compréhension des effets du vent et leur incidence sur le sentiment de présence. Dans un premier temps, nous avons étudié la perception en fonction de quatre types de représentation. Nous avons trouvé que les situations qui incluaient une restitution tactile du vent ont favorisé la compréhension des propriétés du vent ainsi que l'augmentation du sentiment de présence dans la scène. Dans un second temps nous avons analysé la perception de la force et la direction du vent par rapport à l'échelle de force de Beaufort. Les résultats ont montré une surestimation de la force du vent par rapport à l'échelle.

Title: Towards a sensitive representation of wind with a virtual environment.

Keywords: Wind representations - Wind perception - User study - Virtual reality - Urban atmospheres.

Abstract: The wind plays an important role in several fields, among which engineering, architecture and urban planning. Its representations in these fields are mainly visual. They allow to understand the influence of the phenomenon on the project. However, we believe that they can be reductive regarding its sensitive dimension. This dimension can be better identified by other means of expression, such as painting or cinema. Beyond the visual and audiovisual representations, questions regarding the tactile rendition of the wind through virtual reality are also raised. This these aims to explore the various methods to represent the wind that can convey an ambiance intention.

To this end, we have used a virtual reality platform in which we have adapted a system of fans digitally controlled from the virtual scene. We evaluated the understanding of the effects of the wind and their impact on the feeling of presence. First, we have studied the perception depending on four types of representation. We found that the situations including a tactile rendition of the wind fostered the understanding of wind properties and an increased sensation of presence in the scene. Second, we analysed the perception of the wind power and direction on the Beaufort scale. Results showed an overestimation of wind power on that scale.