

*Le projet architectural à l'épreuve de la réalité virtuelle :
conception et perception par l'appréhension visuo-tactile.*

Remerciements :

Je tenais à remercier mes professeurs de séminaire, pour leur accompagnement constant et bienveillant durant ces trois semestres de travail. Ainsi que mes parents, ma sœur et mes amis pour leur soutien et leurs encouragements.

Sommaire :

P5. Introduction

P8. I - Appréhensions visuo-tactile et architecture

- P8. *a - Le toucher*
- P12. *b - La vision*
- P16. *c - Visuo-tactilité et architecture*

P20. II - Système de (re)présentation architecturale.

- P20. *a - Image de synthèse photo-réaliste.*
 - P20. *a - 1. Utilité*
 - P21. *a - 2. Réalisation*
- P22. *b - Architecture immersive en réalité virtuelle.*
 - P22. *b - 1. Utilité*
 - P24. *b - 2. Réalisation*
- P24. *c - Légitimité (?) de la VR par rapport à la 2D photo-réaliste pour la conception d'un bâtiment.*

P26. III - Expérimentation : perception visuelle dans un milieu virtuel

- P26. *a - Protocole et objectif*
- P31. *b - Résultats de la pré-expérience*
- P39. *c - Potentielles améliorations du protocole pour une expérience plus indicative/complète*

P41. Conclusion

P44. Bibliographie

P45. Annexes

« Les mains désirent voir, les yeux désirent caresser. »

Johann Wolfgang von Goethe

Introduction :

Lors de la phase de conception, l'architecte pense l'espace par rapport à son contexte, le milieu dans lequel il se situe. Ce milieu peut avoir un impact sur l'orientation, la forme, les ouvertures, les usages, les matériaux que va choisir l'architecte. Une fois réalisés et construits, tous ces éléments auront un impact sur notre perception architecturale, qui elle, peut être visuelle, tactile, auditive, olfactive.

J'ai voulu m'intéresser dans un premier temps au rapport de nos sens à l'architecture. Pensant que ces dernières années, l'expérience architecturale -de manière générale- que nous pouvons avoir lorsque l'on entre en contact avec un bâtiment est plus portée sur ce que nous pouvons voir que sur ce que nous pouvons sentir en touchant, en écoutant, ou en sentant. Or certains architectes, comme Peter Zumthor et Juhani Pallasmaa, intègrent le facteur sensoriel de l'Homme dans la conception de leurs édifices. Cette minorité dans le milieu de l'architecture m'a poussée à m'intéresser au lien de la perception visuelle et tactile que l'on peut avoir au contact d'une architecture, et plus particulièrement la matérialité et les matériaux qui la compose. Plus précisément, l'appréhension tactile que l'on peut avoir avec le contact visuel d'un matériau sur une surface, que ce soit sur un mur, sur le sol, une assise, ou autre, en voyant un matériau, nous avons une appréhension sur celui-ci : est-ce que ça va être chaud, froid, dur, mou, lisse, rugueux, ondulé, incurvé... ? Chaque jour, tout le monde est confronté à des expériences visuo-tactiles, sans vraiment s'en rendre compte. Par exemple, lorsque vous vous levez au réveil, en sortant du lit,

selon la manière dont est traité le sol de la pièce où vous avez passé la nuit, il vous arrive d'appréhender le moment où vous allez poser les pieds au sol. Vous vous asseyez sur le bord du lit, regardez le sol : du carrelage, sûrement froid, mais lisse. Et vous vous levez, le sol vous refroidit les pieds. Grâce à l'accumulation de différentes expériences de vie similaires depuis la naissance de l'Homme, ces appréhensions dans un milieu réel sont souvent justes. Mais qu'en est-il dans un milieu virtuel ? Les expériences vécues peuvent-elles permettre à l'Homme d'appréhender correctement le contact avec un matériau dans un monde virtuel ?

Dans la phase de conception, l'architecte produit des documents en 2D - plans, coupes, élévations, images photo-réalistes, photomontage - pour présenter le projet à ses clients, au maître d'ouvrage et au public. Ces derniers ne découvrent le bâtiment et les sensations qu'il procure, qu'une fois qu'il est terminé. Or, il se peut qu'une fois terminé, le bâtiment n'offre pas les sensations attendues par toutes les personnes ayant vu les documents 2D, qui auraient dû permettre de les comprendre. Pour effacer cette possibilité, il faudrait modifier une étape dans la phase de conception pour permettre une immersion plus réelle que des images 2D dans le bâtiment.

Je me demande donc si l'approche et la réaction visuo-tactile de l'Homme vers les matériaux d'une architecture dans un milieu de réalité virtuelle peut être aussi fonctionnelle que dans la réalité ?

Pour répondre à cette question, il nous faut d'abord comprendre les différents systèmes perceptifs que sont la vision et le toucher. S'il en existe plusieurs types, il faut expliquer leur différence et leur utilité pour l'Homme. Cela nous permettra de comprendre pourquoi nous pouvons établir un lien entre vision et toucher et pourquoi ils fonctionnent ensemble. Ainsi nous pourrons tisser des liens entre l'architecture de manière générale (tous types de bâtiments du moment que nous avons un contact sensitif) et la perception visuo-tactile. Il s'agira

ensuite de comprendre à quoi servent les rendus photo-réalistes en 2D dans la phase de conception de l'architecte et quelles en sont ses limites pour la compréhension d'un projet. De même pour les modélisations architecturales immersives (en réalité virtuelle). Dès lors, nous pourrons comparer ces méthodes de conception pour comprendre pourquoi est-ce qu'il est plus justifiable de travailler dans un environnement de réalité virtuelle plutôt que sur un rendu photo-réaliste en 2D pour comprendre quels effets l'architecture aura sur nos sens. Enfin, nous détaillerons le protocole d'une pré-expérience visant à évaluer notre capacité à appréhender avec justesse les différentes caractéristiques tactiles d'un matériau architectural par la vue, dans un contexte de réalité virtuelle. Nous pourrons observer les résultats de cette pré-expérience afin d'en tirer des supposition quant à la véracité de ces capacités d'apprehension en VR. Une critique de ce protocole est nécessaire afin d'améliorer le système de récupération des données, la manière dont l'expérimentateur est mis en situation et ce qu'il doit faire pendant l'expérience pour que les résultats de cette dernière puissent nous aider à répondre plus précisément à la problématique énoncée précédemment.

Dans la première partie de ce mémoire, nous parlerons du fonctionnement de la perception tactile et visuelle, ainsi que du fonctionnement de la perception multisensorielle qui dans notre cas est la visuo-tactilité. Dans la deuxième partie, nous comparerons les deux outils de conception que sont les images de rendu photo-réalistes et les modélisation architecturale immersive dans la réalité virtuelle. Dans la troisième partie, nous développerons notre protocole expérimental et nous critiquerons les résultats obtenus ainsi que les potentielles améliorations que l'on pourrait apporter à celui-ci. Enfin, nous finirons par répondre à la problématique dans la conclusion.

I - Appréhensions visuo-tactile et architecture

Dans la thèse Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés soutenue par Jessica Mengaptche Lowe, cette dernière décrit entre autres, les processus de perception visuelle, tactile et multi-sensorielle d'un point de vue technique et biologique ; par rapport à des « matériaux pour le design et la création industrielle ». Ici, nous mêlerons ces explications aux différents récits de Juhani Pallasmaa, Peter Zumthor, Edward T. Hall et Alain Berthoz, qui abordent eux aussi ces questions de perceptions, mais d'un point de vue spatial. Ainsi, cela nous permettra de comprendre comment se comportent nos sens par rapport aux matériaux qui composent un espace architectural.

a - Le toucher

« Tous les sens, y compris la vue, sont des extensions du sens tactile; les sens sont des spécialisations du tissu de la peau et toutes les expériences sensorielles sont des façons de toucher et, par là, reliées aux perceptions tactiles. » Juhani Pallasmaa, Le regard des sens, p. 11

Le sens du toucher permet de percevoir le monde environnant par différents moyens : la kinesthésie, la proprioception, ou simplement le contact cutané. Nous nous intéresserons à la perception cutanée, qui est rendue possible grâce à la peau. Cet organe qui enveloppe l'intégralité de notre corps fonctionne comme un récepteur d'informations sensorielles [1]. Ces récepteurs sensoriels s'activent lorsque la peau entre en contact avec le matériau, et déclenchent des signaux chargés de transmettre les informations au système nerveux, qui les traitera. Ce traitement d'informations permettra de donner une réaction physique en fonction des différentes caractéristiques du matériau qui a été touché. Ces caractéristiques peuvent être de l'ordre

de la température, de la densité, de la texture et peuvent être récupérées à distance ou bien par un contact direct [2].

« *La peau lit la texture, le poids, la densité et la température du matériau.* »
Juhani Pallasmaa, le regard des sens. p. 65

Afin de ressentir avec précision les différentes caractéristiques des matériaux grâce au toucher, nous nous servons de trois récepteurs sensoriels sous-cutanés qui forment un groupe de nerfs qu'on nomme les extérocepteurs [3]. Parmi eux, des thermorécepteurs qui permettent de sentir la chaleur et le froid ; des nocicepteurs qui permettent de ressentir la douleur ; et des mécanorécepteurs qui permettent de définir de manière distincte les déformations et les différences d'une texture. Cette dernière catégorie se composent de quatre entités différentes, qui ont chacune un rôle particulier : Les corpuscules de Ruffini, de Meissner et de Pacini, ainsi que les disques de Merkel. Si l'on parle d'un matériau tel que le crépi par exemple, les disques de Merkel permettront de sentir le caractère pointu, piquant du matériau. Ils provoquent une réaction sensible lors d'une action dynamique portée sur les particularités géométriques de celui-ci (arêtes, formes, courbes...). Les corpuscules de Ruffini réagissent à la pression appliquée sur la peau, ainsi qu'à son étirement. Ils permettent de ressentir le mouvement articulaire. Les corpuscules de Meissner et de Pacini nous servent à distinguer les vibrations. Si nous prenons un parquet en bois comme exemple, ses stries pourront être ressenties grâce à ces deux derniers corpuscules [4].

Le toucher, à la différence des autres sens, peut être volontaire de notre part, surtout si l'on découvre un nouveau matériau. Par curiosité et manque d'expérience, nous allons vouloir explorer ses

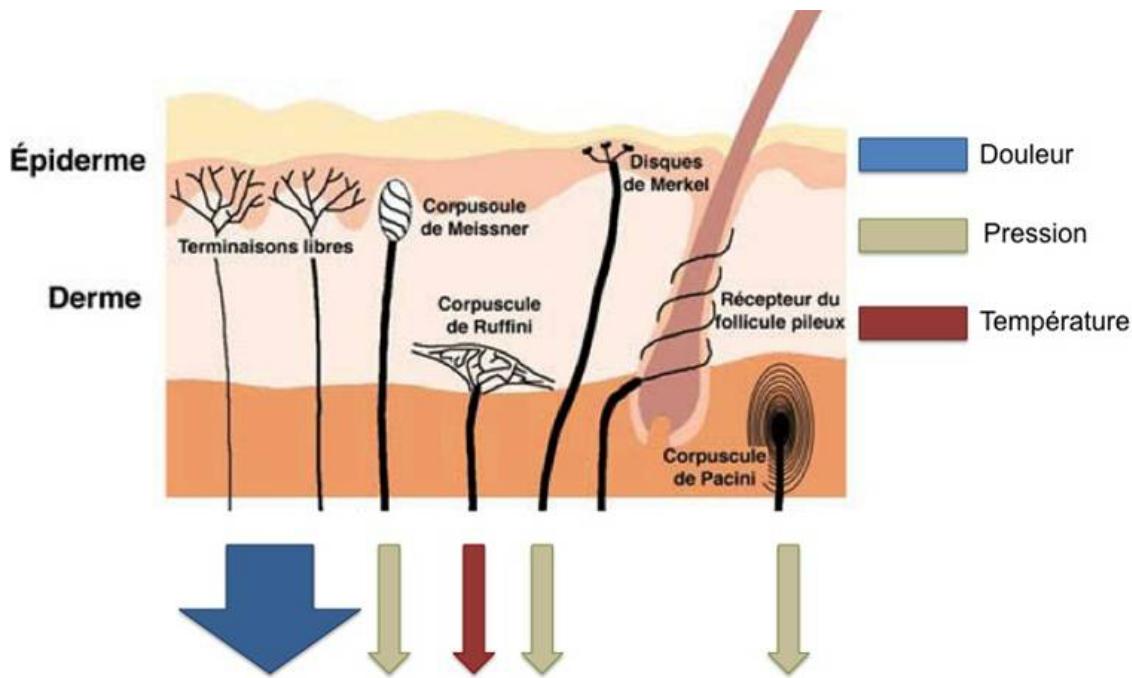


Figure 1- schéma montrant la localisation des différents récepteurs de la peau différentes caractéristiques. Pour ça, nous allons le découvrir grâce à une démarche personnelle, en le manipulant de différentes manières et plusieurs fois, afin d'être sûr des sensations ressenties. Ces nouveaux matériaux peuvent avoir des caractéristiques similaires à des matériaux que l'on connaît. Par exemple, si après avoir fait des travaux, vous enduisez votre mur d'un matériau lisse, que vous n'avez jamais vu, en le touchant, son caractère lisse vous rappellera sûrement un moment antérieur où vous touchiez un mur en béton lissé. Cette sensation apparaît grâce à la mémoire de nos sens. Nous cultivons des souvenirs au fur et à mesure de notre vie, le plus souvent de manière inconsciente, qui ressurgissent lors d'expériences tactiles.

« Le toucher est le mode sensoriel qui intègre notre expérience du monde dans celle de nous-mêmes. » Juhani Pallasmaa, Le regard des sens, p. 11

Dans sa thèse, Jessica Mengaptche Lowe nous parle d'une étude, que Lederman et Klatzky [5] ont porté sur l'exploration manuelle d'objets, que l'on pourrait transposer sur les matériaux en règle générale, sur plusieurs points. Il s'agit de manipuler sans protocole particulier le matériau afin de mesurer ses caractéristiques (température, volume,

etc...). Après avoir observé les sujets, ils ont relevé les actions réalisées le plus fréquemment pour qualifier les caractéristiques. En ce qui nous concerne, nous nous intéressons à la texture, à la dureté et à la température. Les gestes relevés pour ceux-ci sont respectivement : le mouvement tangentiel, l'exercice de la pression et le contact statique. Selon les caractéristiques du matériau que l'on souhaite identifier/ mesurer, nous adopterons donc le geste associé.

Les matériaux peuvent être perçus par le toucher de trois manières différentes : grâce aux touchers passif, actif et dynamique, qui dépendent de la situation dans laquelle nous nous trouvons. Edward T. Hall nous dit dans *la dimension cachée*, que James Gibson fait une distinction entre ces trois types de toucher (il intègre le toucher dynamique au toucher actif). Il définit le toucher actif comme une action volontaire d'exploration de notre part, et le toucher passif comme un acte involontaire, autrement dit le fait d'être touché. D'après ces expériences, si l'on utilise uniquement le sens du toucher, nous serions capable de reproduire avec une précision de 95% des objets que l'on ne peut pas voir. Le toucher passif lui a une précision de 49% [5].

D'un point de vue architectural, la mémoire du sens du toucher permet de cultiver une sensibilité qui nous est propre. Elle nous permet d'apprécier chacune de nos expériences en tant qu'utilisateur. Durant de nombreuses années, contrairement aux designers, les architectes ont utilisé les sensations que procurent les sens de manière hasardeuse : pourtant notre peau nous permet tout de même de ressentir les différences de température entre les espaces que nous parcourons, des murs qui nous entourent, du sol sur lequel nous nous déplaçons ; ainsi que tous les matériaux qui les composent, avec fidélité [6].

« c'est le souvenir d'expériences tactiles qui nous permet d'apprécier la texture. » Edward T. Hall, *la dimension cachée*, chapitre 5

b - La vision

Parlons maintenant du sens de la vue. L'œil, qui est l'organe indispensable à la vision, est composé d'un ensemble de photorécepteurs : les cônes et les bâtonnets. Ces deux types de cellules sont complémentaires, et sont à la base du fonctionnement de la vision, puisqu'elles reçoivent la lumière. Les cônes nous permettent de voir les couleurs ainsi que de distinguer correctement les objets. Ils ne sont pas sensibles à la lumière de haute intensité. A contrario, les bâtonnets, beaucoup plus sensibles à la lumière, nous permettent de voir dans un contexte de faible éclairement, dans la nuit par exemple. Par contre ils ne peuvent pas distinguer les couleurs, et les détails [7].

La rétine, qui permet de capter la lumière, est constituée de trois parties distinctes que sont la fovéa, la macula et la zone de vision périphérique. Ces zones ont chacune une fonction particulière. Elles nous permettent de voir de trois manières spécifiques, et finiront par fonctionner en même temps [8].

- La fovéa (située dans la macula) nous permet de voir avec beaucoup de précision et à une distance d'environ trente centimètres, de petits éléments mesurants minimum un quart de millimètre ou un demi-centimètre en fonction des personnes.
- La vision maculaire, aussi appelée vision centrale, améliore la qualité du centre de notre champ de vision. C'est aussi elle qui nous permet de voir de jour, et de voir les couleurs.
- La vision périphérique nous permet de voir à 180 degrés lorsque l'on regarde droit devant nous, et est particulièrement sensible au mouvement du contexte perçu.

L'œil et le cerveau sont reliés par le nerf optique, qui sert de liaison entre la captation du message nerveux et son traitement.

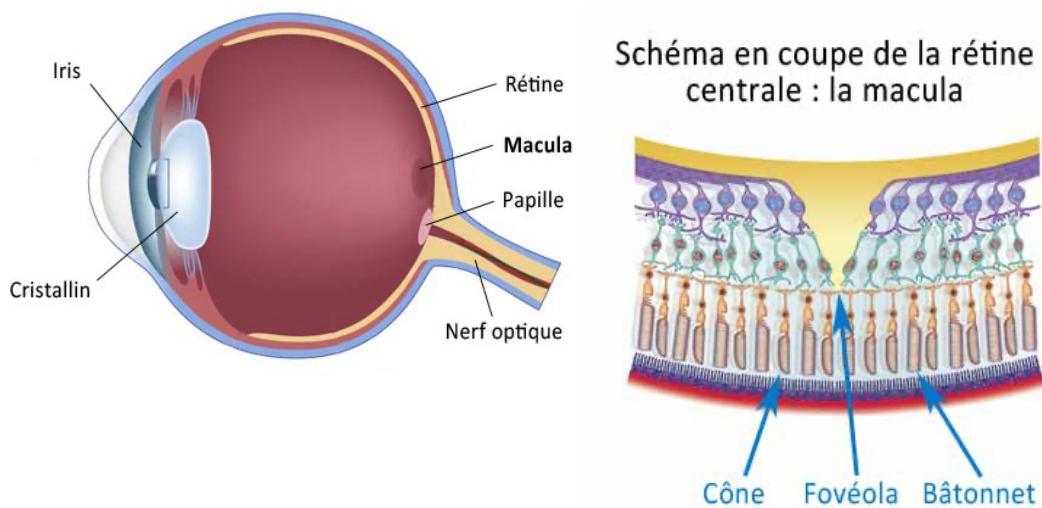


Figure 2 – Schémas illustrant la composition de l'œil

En s'appuyant sur des études effectuées par J. Gibson et H. N. J. Schifferstein qui démontrent que la vision est le premier sens qui perçoit les propriétés de surface d'un matériau, Jessica Mengaptche Lowe nous apprend que la perception par la vue est rapide et active : il nous faudrait moins d'une seconde pour reconnaître un objet en le voyant, tandis que si nous pouvions uniquement le toucher, il nous faudrait entre cinq et six secondes pour l'identifier. Cela montre qu'elle est le moyen le plus rapide et le plus précis pour mesurer les caractéristiques qui définissent un objet ou un matériau (forme, dimension, couleur, etc...) [9].

« L'œil remplit beaucoup de fonctions chez l'Homme. Il lui permet entre autres d'identifier à distance des aliments, des personnes amies, la nature de nombreux matériaux. » Edward T. Hall, la dimension cachée, chapitre 6

En ce qui concerne la perception de la texture d'un matériau par la vue, nous sommes attentif à quatre caractéristiques : la brillance, la régularité, le contraste et la dureté. Pour traiter les informations

perceptives que nous apporte notre sens visuel, notre cerveau synthétise ce que l'on voit pour en faire une globalité que nous pouvons comprendre rapidement. Cette compréhension est rendue possible grâce à plusieurs mécanismes cognitifs. Ces mécanismes ont été explicités par les sept lois :

- La loi de la bonne forme (A) : les autres lois découlent de celle-ci : Notre cerveau simplifie de manière automatique, la perception d'un ensemble d'éléments regroupés comme une forme géométrique simple, symétrique, stable, autrement dit une bonne forme (carré, triangle, cercle, etc....).
- La loi de la continuité (B) : des points rapprochés tendent à représenter des formes lorsqu'ils sont perçus, nous les percevons d'abord dans une continuité, comme des prolongements les uns par rapport aux autres.
- La loi de la proximité (C) : nous regroupons les points d'abord les plus proches les uns des autres.
- La loi de la similitude (D) : si la distance ne permet pas de regrouper les points, nous nous attacherons ensuite à repérer les plus similaires entre eux pour percevoir une forme.
- La loi du destin commun (E) : des parties en mouvement ayant la même trajectoire sont perçues comme faisant partie de la même forme.
- La loi de clôture (F) : notre cerveau va tenter de combler les vides afin percevoir une forme dans sa totalité.

Ces principes découlent de la théorie de la forme et des organisations, amenée par Gestalt. Par sa théorie, ce dernier pense que notre cerveau simplifie notre perception de l'environnement pour qu'on puisse le comprendre, grâce à un processus de comparaison de l'objet perçu avec des formes usuelles [10].

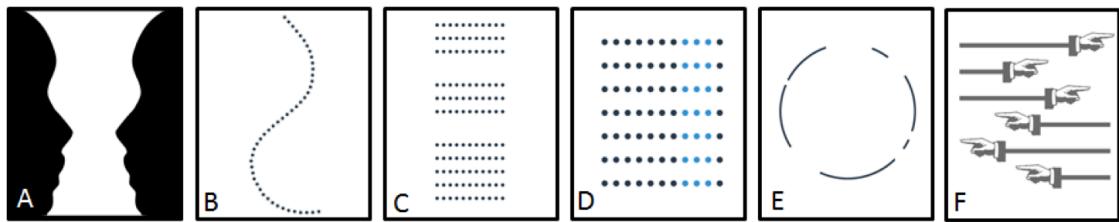


Figure 3 – Illustrations des loi de Gestalt

Une étude menée par Hanada montre que le sens visuel nous permet de décrire notre perception des textures avec justesse : elle a consisté à demander à quarante cinq personnes d'exprimer leur perception sensorielle sur un échantillon de cinquante objets, avec des mots, pour qualifier les caractéristiques citées précédemment. À la fin de cette expérience, plusieurs similitudes sont ressorties entre plusieurs participants, qui ont permis de concrétiser cette justesse. En effet, il se trouve que les mots qui sont ressortis, correspondent au ressenti de la perception tactile de ces mêmes objets.

Donc, cette expérience nous permet de penser que la perception d'une texture peut se faire à la croisée de plusieurs sens (le toucher et la vue), puisqu'elle est qualifiée avec le même vocabulaire [1].

« Berkley prétendait en effet que l'Homme évalue la distance grâce à l'interrelation de ses sens et à leur intégration dans son expérience passée. » Edward T. Hall, la dimension cachée, chapitre 6

c - Visuo-tactilité et architecture

« La perception est, par essence, multisensorielle : elle utilise des référentiels labiles et multiples adaptés à l'action en cours » Alain Berthoz, le sens du mouvement.
Chapitre 5

Vient maintenant le phénomène de visuo-tactilité. Tout d'abord, pour percevoir des textures, nous utilisons plusieurs de nos sens. Chacun contribue à ce processus en utilisant ses particularités. Pour ce qui est du caractère visuo-tactile, il permet une perception générale de la texture grâce à la combinaison des informations sensorielles amenées par la vue et le toucher. La vision nous permet d'acquérir des informations sur les propriétés de surface, que l'on a énumérées dans la partie précédente. Après les avoir perçues visuellement, le toucher est invité à découvrir ces surfaces, et à récupérer, lui aussi, des informations sensorielles à propos de leurs propriétés. Lorsque plusieurs sens traitent la même surface, plusieurs cas se présentent à nous. Premièrement, nos sens ont relevé les mêmes informations d'un matériau donné. Deuxièmement, nos sens ont relevé les mêmes informations sur ce matériau, mais un des sens est plus précis et plus rapide que l'autre. Troisièmement, nos sens n'ont pas relevé les mêmes informations à propos d'un matériau. Quatrièmement, nos sens n'ont pas relevé les mêmes informations, mais celles-ci se complètent. Selon le cas qui se présente, nos sens peuvent être en conflit. Il peut aussi y avoir un sens dominant : les deux sens que sont la vue et le toucher ne relèvent pas les informations d'un élément de la même manière. En ce qui concerne la vue, les informations sont évaluées de manière générale, elle agit sur un ensemble. Tandis que pour le toucher, les informations sont évaluées au fur et à mesure, par séquence. Par conséquent, la manière d'évaluer les propriétés d'un matériau par le toucher est donc plus lente que celle de la vue.

Plusieurs études ont été réalisées pour comparer la perception tactile et la perception visuelle. Une première étude adapte la vue au toucher en obligeant la vue à procéder par séquence, en limitant le champ de vision. L'objectif est de savoir si les deux sens perçoivent les mêmes informations, ou si l'un reste plus performant que l'autre. En l'occurrence, cette étude a permis de révéler que la manière de percevoir influe sur nos capacités de perception, car il a été observé que les deux sens ont obtenu des résultats équivalents.

D'autres études ont été menées par Binns, Ledeman, Abbott, Drewing et al, Bergmann Tient et Kappers, dans le but de comparer ces deux sens. Chaque expérience est différente : elles portent respectivement sur douceur, rugosité, classements de textures perçues. Toutes s'accordent pour dire que vision, toucher et visuo-tactilité perçoivent des informations équivalentes pour un même élément [12]. James Gibson, qui a aussi travaillé sur les rapports entre vision et toucher, considère qu'à partir du moment où ces sens sont informatifs, alors « la richesse des impressions sensorielles ne manque pas d'être accrue. » [13]

« Les expériences tactile et visuelle de l'espace sont si intimement associées qu'il est impossible de les séparer. » Edward T. Hall, la dimension cachée, chapitre 5

De plus le système de perception visuo-tactile ne permet pas seulement d'interpréter des messages sensoriels, mais aussi de les anticiper. En effet, depuis notre enfance, nous développons tous nos sens à l'aide de l'expérience et de la mémoire. Une partie de notre cerveau que l'on appelle la "mémoire du travail", fonctionne comme un mécanisme de prédiction des conséquences de nos actions, en utilisant nos souvenirs [14]. Le principal rôle de la mémoire est de nous aider à savoir quelles seront les conséquences de nos actes grâce à notre passé. Si nous reprenons par exemple, la scène de vie citée dans

l'introduction, la mémoire nous permet de savoir, avant de poser les pieds sur le carrelage, que le sol sera froid.

« Selon les cultures, les individus apprennent dès l'enfance, et sans même le savoir, à éliminer ou à retenir avec attention des types d'information très différents. Une fois acquis, ces modèles perceptifs semblent fixés pour toute la vie. » Edward T. Hall, la dimension cachée, chapitre 4

Ces souvenirs, ainsi que l'expérience que l'on acquiert au fil du temps, nous servent à concevoir des espaces adaptés à nos sens. C'est-à-dire à nos pratiques, à nos habitudes, qui prennent vie grâce à l'architecture. Or en occident, les architectes et techniciens qui conçoivent nos espaces ont tendance à oublier nos sens, et par conséquent, ils nous privent de nouvelles expériences sensorielles [15]. En effet, cette négligence corporelle et sensorielle dans la conception architecturale déshumanise les bâtiments. Ces derniers deviennent davantage des objets d'exposition et perdent leur caractère interactif avec les humains. La ville actuelle est devenue en grande majorité la ville de l'œil.

« L'architecture moderne a acquis sa conscience dans la reconnaissance de son inclination vers la nature visuelle des projets. « L'architecture extérieure semble avoir intéressé les architectes d'avant-garde aux dépens de l'architecture intérieure. Comme si une maison devait être conçue pour le plaisir des yeux plus que pour le bien-être de ses habitants », écrit Eileen Gray » Juhani Pallasmaa, Le regard des sens, p. 68

Mais le fait de privilégier la vue dans la conception ne devrait pas avoir pour conséquence de rejeter les autres sens. Au contraire, les sens ne fonctionnent jamais mieux que lorsqu'ils sont plusieurs à être sollicités. La vision appelle le toucher à participer. Dans le domaine architectural, la perception des espaces devrait inéluctablement intégrer le toucher, la stimulation de notre peau, de nos muscles. Kent C. Bloomer et

Charles W. Moore pensent que nos logements manquent "d'interactions potentielles entre le corps, l'imagination et l'environnement" [16]. Ce manque peut-être comblé par les futurs architectes. Au même titre qu'aux problématiques écologiques, ou sociales, ils doivent aussi réfléchir à la manière dont on conçoit un projet savant, grâce aux compétences qu'ils apprennent à maîtriser ainsi qu'à leurs propres expériences architecturales.

« C'est en nous-mêmes que réside la force d'un bon projet, dans notre aptitude à percevoir le monde avec sensibilité et compréhension. Un bon projet architectural met en oeuvre les sens et l'intelligence. » Peter Zumthor, Penser l'architecture, « Enseigner l'architecture, apprendre l'architecture »

Ces changements commencent à s'appliquer dès la phase de conception d'un projet, pour un particulier ou pour une commande publique. Un des problèmes majeurs est que les architectes pensent majoritairement par la vue, grâce à la production d'images de synthèse photo-réalistes. Or, ces images ne reflètent que l'apparence d'un bâtiment. Elles permettent de modifier les paramètres esthétiques, et de vendre le projet avec une belle image. L'objectif serait de trouver une méthode permettant aux architectes d'intégrer dans la phase de conception, une réflexion sur l'intégration des sens dans la perception spatiale. Nous pensons qu'un des moyens qui pourrait être fonctionnel est la mise en situation des utilisateurs directement dans l'espace habité, grâce à la modélisation d'espaces architecturaux dans un environnement virtuel.

« Ce cancer de la représentation architecturale superficielle d'aujourd'hui, dépourvue de toute logique tectonique et de tout sens de la matérialité et de l'empathie, appartient clairement à ce processus. » Juhani Pallasmaa, Le regard des sens, p. 27 (Le processus en question est ce qu'il qualifie de croissance cancéreuse de la vision)

II – Système de (re)présentation architecturale

a – Image de synthèse photo-réaliste

a – 1. Utilité

Aujourd’hui, une des manières les plus utilisées pour présenter de façon réaliste la mise en œuvre de matériaux sur un bâtiment au stade de projet (dans la phase de conception, que ce soit pour de la réhabilitation ou une construction neuve) est de le représenter grâce à la technique d’images photo-réalistes.

Ces images servent en général à répondre à des concours en montrant le projet terminé, dans son contexte. Elles permettent de “vendre du rêve”, une image idéale et magnifiée d’une construction potentielle, future. Elles permettent de se rendre compte de l’état général d’un projet puisqu’elles illustrent les rapports colorimétriques, géométriques, paysagers entre eux, en en faisant profiter une majorité de personnes, puisqu’elles peuvent être imprimées à grande échelle et exposées devant un chantier, en général dans la rue (ex : panneaux de chantier + image photo-réaliste qui présentent un chantier en cours).

« *L’image informatisée tend à aplatiser nos capacités d’imagination magnifiques, multi-sensorielles, simultanées et synchrones, en faisant du processus de dessin une manipulation visuelle passive, un parcours rétinien.* » Juhani Pallasmaa, *Le regard des sens*, p.13

Grâce à notre expérience personnelle, nous avons pu aussi nous rendre compte de l’utilité de ces images dans des agences qui réalisent majoritairement des missions privées. Dans ce cas là, des images montrant l’aspect général de la maison permettent aux clients de s’imaginer la maison et son rapport avec le contexte environnant, comme la végétation, les clôtures, les chemins. Ils demandent aussi la réalisation d’images intérieures, qui sont aménagées avec des

meubles choisis par leurs soins, pour se rendre compte du projet fini. Mais en aucun cas ils ne demandent des images aux architectes à des fins sensorielles, pour percevoir quelles sensations l'espace va leur procurer.

a - 2. Réalisation

Il existe plusieurs méthodes permettant de réaliser des images photo-réalistes. Soit à partir d'une perspective, soit à partir d'un modèle 3D.

Dans le premier cas, il faut réaliser une perspective du projet, puis lui donner l'aspect souhaité grâce à des logiciels de traitement d'image, comme Photoshop. Pour se faire, il faut soit avoir une banque d'images de matériaux, soit créer nos images (à partir des outils que propose le logiciel, ou à partir d'images quelconques). Ces images seront appliquées sur la perspective, puis retouchées jusqu'à ce que le résultat soit satisfaisant. Une fois la vue terminée, il ne restera plus qu'à l'exporter dans le format souhaité (PDF, PNG, JPEG...).

Le second cas consiste à modéliser le projet en 3D sur un logiciel adapté (Rhinocéros, SketchUp, 3Ds max, Blender...). Une fois réalisé, il faut importer la 3D dans un logiciel de rendu photo-réaliste (Lumion, V-ray, Artlantis, Twinmotion...) et la traiter avec des images de matériaux et des fichiers de bump mapping, qui permettent d'apporter une impression de relief, de texture, de réflexion solaire. Après avoir texturé la 3D, il faut exporter des vues (comme si nous prenions des photos à l'aide d'un appareil photo) qui seront traitées sur un logiciel de post-production (Photoshop, Illustrator, Lightroom...). Il ne reste qu'à exporter l'image, de la même manière que pour le premier cas.

La dernière méthode de réalisation d'une image de rendu se fait à l'aide d'une modélisation 3D. Il faut simplement extraire des vues depuis le logiciel de 3D, que l'on importe directement dans un logiciel

de traitement d'image/post-production, sans passer par un logiciel de rendu comme Lumion, V-Ray ou Artlantis. Une fois les vues importées, il ne reste qu'à remplir la perspective, comme pour la première méthode.



Figure 4 – image de rendu photo-réaliste

Les 3 méthodes fonctionnent toutes très bien, chacun est libre de pratiquer celle qui lui convient le mieux.

b - Architecture immersive en réalité virtuelle

b - 1 Utilité

L'intérêt d'utiliser l'immersion architecturale dans un environnement de réalité virtuelle serait de pouvoir percevoir les espaces d'une manière proche de la réalité physique. Plus particulièrement grâce à notre capacité d'appréhension visuo-tactile, avérée dans la réalité. L'objectif de ce travail est de renseigner la fonctionnalité de l'appréhension visuo-tactile dans un milieu de réalité virtuelle. Dans le cas où la réponse est oui, cela permettrait de se servir de ce mécanisme sensoriel afin de servir le domaine de l'architecture.

À la différence de l'image de rendu photo-réaliste, l'immersion virtuelle vise à toucher un public plus restreint (les clients et les personnes qui travaillent sur le projet pour la 3D, contre des personnes extérieures au projet pour la 2D).

Alexis Paljic a réalisé une expérience dans laquelle l'utilisateur d'un atelier virtuel devait modifier les paramètres d'un matériau (en l'occurrence la peinture d'une voiture) grâce à la comparaison de plusieurs morphologies prédefinies, jusqu'à ce que celui-ci lui convienne. Après le réglage de ces paramètres, l'échantillon prototype du matériau était fabriqué. L'objectif était que ce dernier ressemble au rendu virtuel, dans le but de savoir si l'utilisateur pouvait s'imaginer virtuellement un matériau proche d'un matériau physique. Les résultats de l'expérience ont montré une cohérence perceptive entre réel et virtuel selon deux critères de comparaison que sont la taille et la densité des paillettes qui constituent la peinture de la voiture [17].

Cette expérience laisse à penser que les sens peuvent être fonctionnels dans un environnement virtuel.



Figure 5 - équipement nécessaire à la VR

b - 2 Réalisation

De la même manière que pour le deuxième cas de la réalisation d'une image photo-réaliste, celle d'un environnement de réalité virtuel commence par la conception d'une 3D sur un logiciel adapté. Il faut ensuite importer le modèle 3D dans un logiciel de rendu photo-réaliste, permettant le fonctionnement de l'équipement (casque de réalité virtuelle, contrôleurs) nécessaire au déplacement et à la visualisation de l'environnement virtuel, comme Twinmotion par exemple. Après avoir texturé le modèle 3D, il ne reste plus qu'à connecter l'équipement à l'ordinateur et explorer l'environnement virtuel.

c - Légitimité de la VR par rapport à la 2D photo-réaliste

« La vue d'un plan n'a aucun rapport avec l'expérience vécue de l'architecture. Toute bonne architecture offre des formes et des surfaces façonnées pour un toucher agréable à l'œil. » Juhani Pallasmaa, Le regard des sens, p. 50

Bien que ces deux outils puissent être utilisés dans la phase de conception d'un projet, dans le cas où l'appréhension visuo-tactile dans un milieu virtuel serait fonctionnel, l'utilisation de l'image de synthèse photo-réaliste n'aurait plus beaucoup d'intérêt à ce stade du projet. Évidemment, le contexte reste déterminant pour le choix de l'outil de conception. On va sûrement préférer l'image 2D pour un concours, et préférer l'immersion 3D pour un projet privé, selon leurs qualités et leurs avantages.

Emma Kaidi nous apprend dans son mémoire de recherche (portant sur les styles d'image de rendu) que malgré les travaux très qualitatifs des perspectivistes, au point de confondre leur travaux avec de vraies photographies, les nouvelles technologies de représentation nous permettraient de nous remettre en question quand à l'utilisation

de la 3D dans le domaine architectural. Cette évolution permet de mettre en œuvre de nouveaux système d'expositions, comme des expériences de balades architecturales virtuelles, qui ont été testées récemment pour palier la fermeture des lieux culturels due à la pandémie COVID-19 [18].

L'intégration de la compétence de visuo-tactilité de l'être humain dans la conception de projets architecturaux permettrait de réintégrer nos sens, nos corps, notre mémoire et notre imagination à la ville actuelle.

« dans l'ensemble, le dessin moderne a intégré l'intelligence et l'œil, mais il a abandonné le corps et les autres sens, ainsi que nos mémoires, notre imagination et nos rêves. » Juhani Pallasmaa, Le regard des sens, p. 20

III - Expérimentation : Perception visuelle dans un milieu virtuel

a - Protocole et objectif

L'objectif de cette expérience est de savoir si notre approche visuo-tactile vis-à-vis des matériaux architecturaux fonctionne dans un milieu de réalité virtuelle. Pour pouvoir exécuter cette expérience, nous avons besoin de mettre en place deux choses :

La première est un environnement virtuel retranscrivant correctement le bâtiment ainsi que les matériaux mis en œuvre sur celui-ci. Dans notre cas, nous allons nous servir d'une étude que nous avons réalisé en parallèle en atelier de projet sur la Casa Rudofsky. Nous réalisons une modélisation 3D du bâtiment sur Rhino 6, que nous lions grâce à un plug-in, au logiciel de rendu photo-réaliste Twinmotion 2021. Une fois le volume du bâtiment terminé, nous commençons par poser des matériaux sur les différents éléments qui le compose (poutres, murs, etc...) dans rhino 6, grâce à la bibliothèque de matériaux intégrée dans le logiciel, pour pouvoir les différencier. Si la différence matérialistique n'est pas faite, Twinmotion considérera que tous les éléments ont les mêmes propriétés. Donc lorsque l'on intégrera une texture à un élément, tous ceux qui n'auront pas été différenciés (ceux qui auront les mêmes propriétés) prendront instantanément la même apparence. Après avoir différencié chaque élément, nous synchronisons la modélisation Rhino avec Twinmotion grâce au plug-in.

Vient maintenant la phase de réalisation des textures. Même si twinmotion a une grande bibliothèque de matériaux, ce ne sont que des aplats de textures, sans aucun relief, ni impression de relief. Il va donc falloir créer cette impression de relief grâce au bump mapping qui est une technique qui consiste à donner du relief à des éléments en 2D, 3D et à des textures par l'intégration d'un fichier RVB en 3D (normal

map) qui permet de donner le relief et d'un fichier en noir et blanc (height map) qui permet de donner les ombres et les hauteurs.

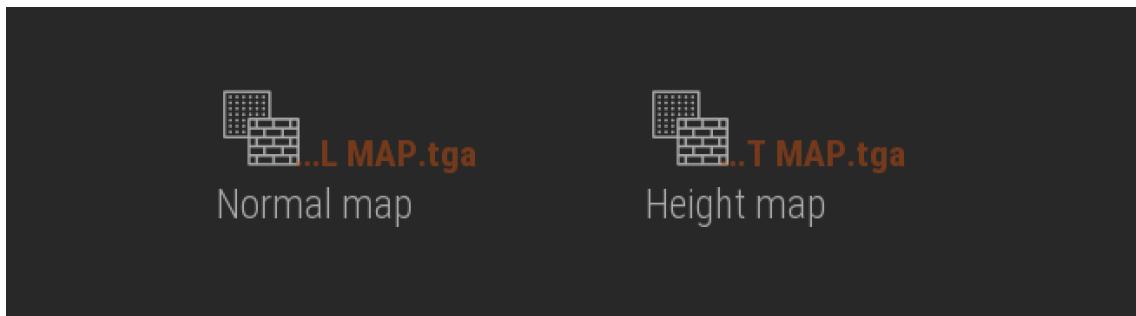


Figure 6

Ici deux solutions s'offrent à nous. Soit une des textures du logiciel nous convient pour l'expérience en correspondant au matériau de la maison en question (en l'occurrence la chaux) : il ne nous reste qu'à intégrer les fichiers de bump mapping que l'on peut récupérer gratuitement sur internet si ceux-là conviennent pour ce que l'on veut faire. Soit nous prenons en photo un matériau que l'on a réalisé physiquement pour lui donner l'apparence et la texture souhaitées, que nous intégrons ensuite sur Twinmotion.



Figure 7

Dans les deux cas nous pouvons prendre des fichiers de bump mapping existants, ou créer nos propres fichiers grâce à des logiciels spécialisés comme PixPlant : celui-ci, après avoir intégré une photo avec le relief attendu, crée tous les fichiers nécessaires automatiquement en gérant les bordures de l'image pour ne pas voir de motif à répétition une fois la texture posé sur un élément, donc un logiciel de texture dite « seamless » (sans couture).

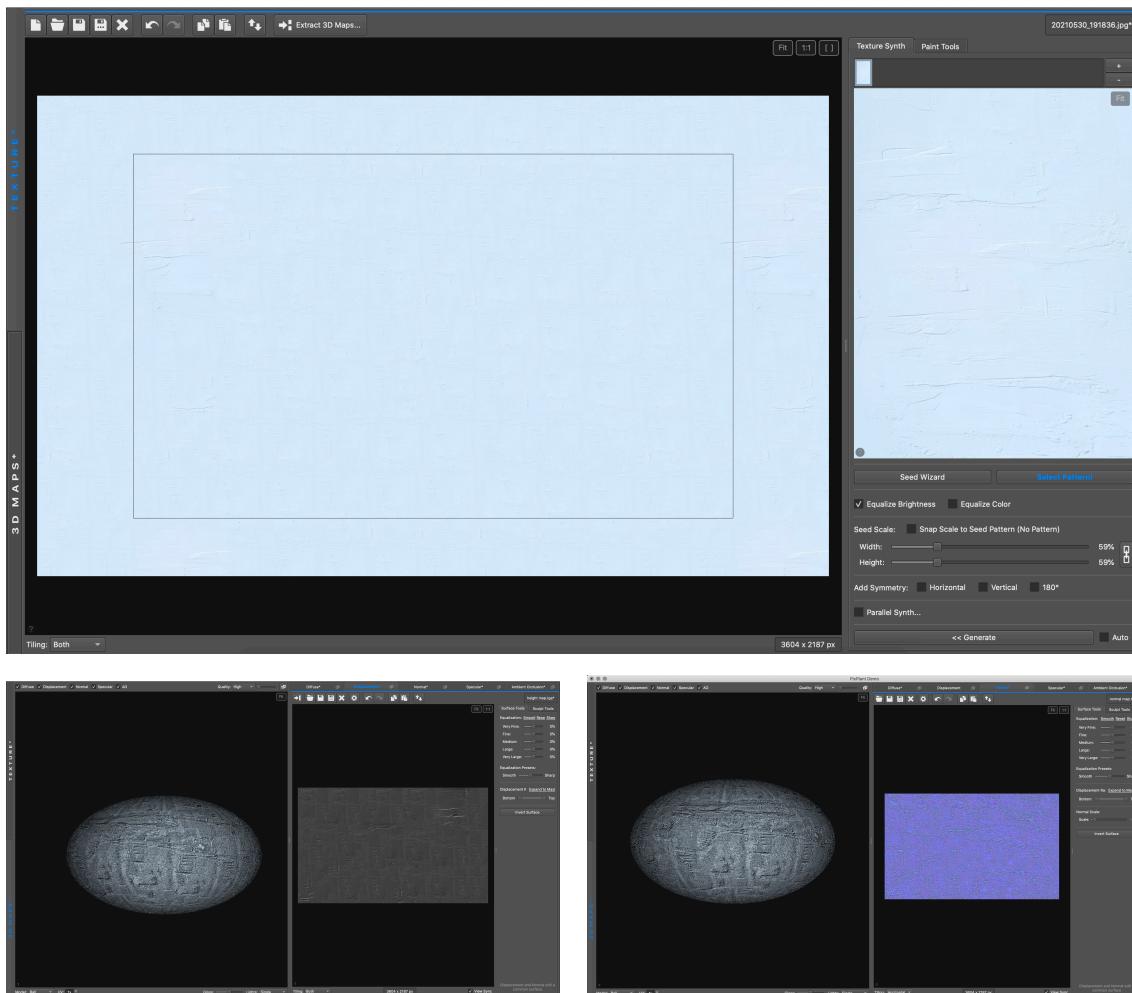


Figure 8, 9, 10

Mais nous pouvons aussi nous servir de Photoshop : il faut importer une photo du relief attendu, puis dans la barre de tâches aller dans Filtre, puis 3D, et sélectionner normal map, et height map. Photoshop se chargera de créer les deux fichiers à partir de la photo, qu'il faudra ensuite exporter sous « .tga ». En revanche, il faut traiter l'image soi-

même pour avoir une texture seamless. Dans notre cas, nous avons réalisé le matériau physiquement pour pouvoir avoir un échantillon réel de ce que l'on voit sur la 3D.

Une fois que l'image et les fichiers normal et height map sont intégrés dans le logiciel, et qu'ils sont incrustés dans la 3D, il faut régler les différentes options que sont l'échelle de l'image, la position du soleil pour la lumière, et le pourcentage de relief de la texture.

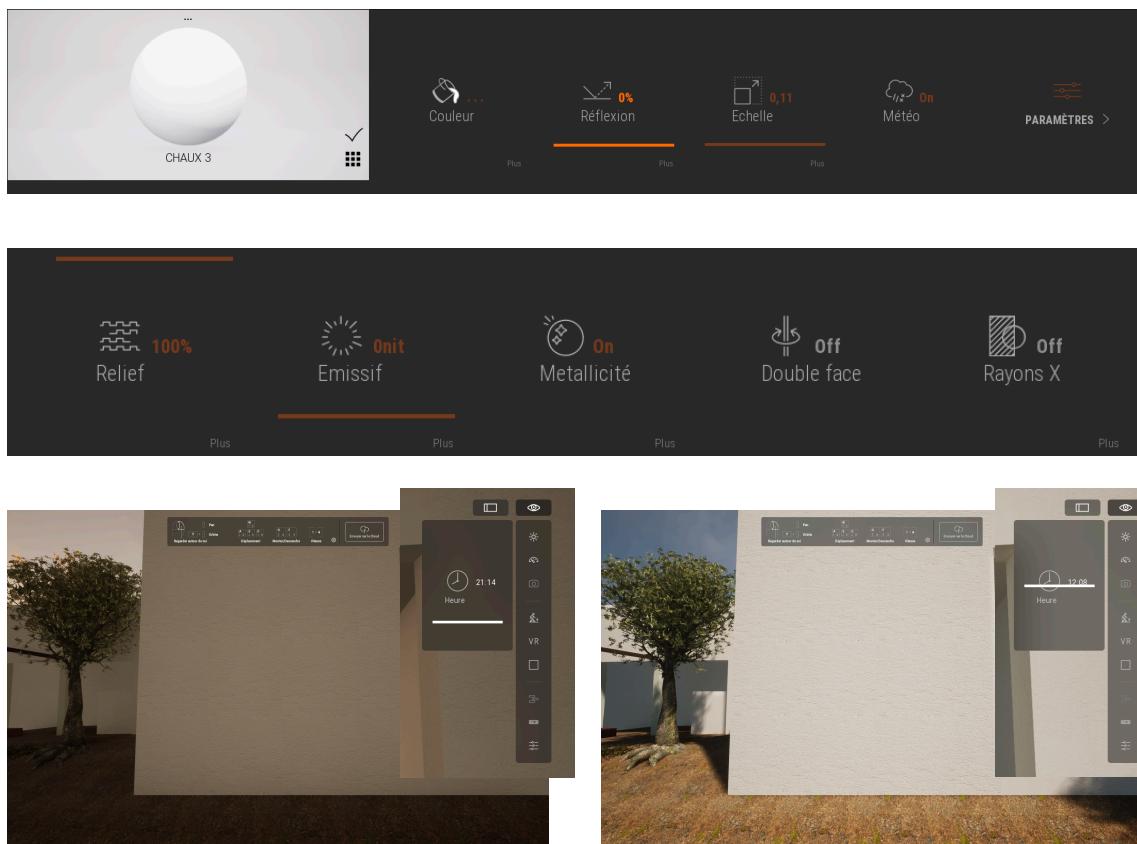


Figure 11, 12, 13, 14

La deuxième chose est un système de récupération des données, qui nous permettra d'analyser le comportement des différents utilisateurs dans cette expérience. Un QCM en trois parties : la première questionne la texture, la deuxième questionne la consistance, et la troisième questionne la température du matériau présenté dans l'expérience. Chacune des parties comportera plusieurs choix, avec la possibilité de cocher plusieurs réponses.

Ce QCM leur sera présenté deux fois. Dans un premier temps les trois utilisateurs vont entrer tour à tour dans le milieu de réalité virtuelle. Une fois à l'intérieur, il leur est demandé de se déplacer autour de la maison sans regarder directement les murs de celle-ci, dans le but de se servir de la vision périphérique. Évidemment, à l'intérieur du milieu virtuel, ils ne pourront pas toucher le matériau.



Figure 15, 16

En sortant, ils devront chacun remplir le QCM. Ensuite, les trois utilisateurs seront confrontés à l'échantillon physique du matériau, dans la réalité. Un des trois pourra seulement le voir (utilisateur 1), un autre seulement le toucher sans le voir (utilisateur 2), et le dernier pourra le toucher et le voir (utilisateur 3). Après ça, ils devront de nouveau remplir le QCM par rapport à cette dernière expérience et non plus par rapport à la VR. Nous récupérerons ensuite les QCM pour traiter les résultats, qui permettront de vérifier les hypothèses suivantes :

1. La vue suffit pour avoir les bonnes appréhensions tactiles vis-à-vis du matériau présenté dans un milieu de réalité virtuelle.

2 . La vue ne suffit pas pour avoir les bonnes appréhensions tactiles vis-à-vis du matériau présenté dans un milieu de réalité virtuelle.

Si les résultats entre le premier et le deuxième QCM sont identiques, la première hypothèse est juste : alors le système de visualisation d'un projet architectural dans un milieu de réalité virtuelle pourrait être possible dès la phase de conception, car les capacités d'appréhension visuo-tactile de l'Homme en VR seraient aussi fonctionnelles que dans la réalité.

Si les résultats varient entre le QCM 1 et 2, cela voudrait dire que l'appréhension visuo-tactile dans un milieu de réalité virtuelle n'est pas aussi fonctionnelle que dans la réalité, donc cette approche ne serait pas encore envisageable pour concevoir un projet architectural.

b - Résultats :

La mise en oeuvre de la pré-expérience ayant été un peu différente du protocole expérimental présenté précédemment, les résultats ne pourront pas être interprétés comme ce qui été prévu. Le laps de temps entre la préparation des différents éléments (environnement 3D, QCM et échantillon physique) nécessaires à la réalisation de la pré-expérience a fait que l'échantillon physique qui a été utilisé pour réalisé la texture 3D s'est dégradé et a donc changé d'apparence (sa texture et sa matérialité). Les résultats du QCM qui porte sur l'appréhension visuo-tactile dans le milieu de réalité virtuelle ne seront pas comparables avec ceux portant sur l'appréhension visuo-tactile dans la réalité. Mais la potentielle concordance des résultats entre utilisateurs pour une même étape de la pré-expérience est possible et permet d'apporter un élément de réponse à la

problématique. Par exemple : tous les résultats sont les mêmes pour la phase d'exploration virtuelle, et tous les résultats sont les mêmes pour la phase d'observation du matériau physique.

Lors de cette pré-expérience, trois personnes ont réalisé le protocole énoncé précédemment. Chacune de ces trois personnes ont rempli les QCM :

Cas N°1 : Milieu Virtuel

1 - Texture du matériau :

- Lisse Râpeux Rugueux doux
 Granuleux Autre Je ne sais pas

2 - Consistance du matériau :

- Dur Mou Friable Autre
 Je ne sais pas

3 - Température du matériau :

- Chaud Tiède Froid Autre
 Je ne sais pas

Cas N°1 : Voit et touche

1 - Texture du matériau :

- Lisse Râpeux Rugueux doux
 Granuleux Autre Je ne sais pas

2 - Consistance du matériau :

- Dur Mou Friable Autre
 Je ne sais pas

3 - Température du matériau :

- Chaud Tiède Froid Autre
 Je ne sais pas

Cas N°2 : Milieu Virtuel**1 - Texture du matériau :**

- Lisse Râpeux Rugueux doux
 Granuleux Autre Je ne sais pas

2 - Consistance du matériau :

- Dur Mou Friable Autre
 Je ne sais pas

3 - Température du matériau :

- Chaud Tiède Froid Autre
 Je ne sais pas

Cas N°2 : Voit mais ne touche pas

1 - Texture du matériau :

- Lisse Râpeux Rugueux doux
 Granuleux Autre Je ne sais pas

2 - Consistance du matériau :

- Dur Mou Friable Autre
 Je ne sais pas

3 - Température du matériau :

- Chaud Tiède Froid Autre
 Je ne sais pas

Cas N°3 : Milieu Virtuel**1 - Texture du matériau :**

- Lisse Râpeux Rugueux doux
 Granuleux Autre Je ne sais pas

2 - Consistance du matériau :

- Dur Mou Friable Autre
 Je ne sais pas

3 - Température du matériau :

- Chaud Tiède Froid Autre
 Je ne sais pas

Cas N°3 : Touche mais ne voit pas

1 - Texture du matériau :

- Lisse Râpeux Rugueux doux
 Granuleux Autre Je ne sais pas

2 - Consistance du matériau :

- Dur Mou Friable Autre
 Je ne sais pas

3 - Température du matériau :

- Chaud Tiède Froid Autre
 Je ne sais pas

Nous rappelons que pour pouvoir étudier de manière plus précise les résultats de cette expérience, il aurait fallut avoir un échantillon de personnes beaucoup plus élevé.

Les résultats du QCM pour la première partie de la pré-expérience (dans le milieu virtuel) :

La texture du matériau virtuel a été qualifiée de "douce", "râpeuse" et "granuleuse" une fois, et de "rugueuse" deux fois.

La consistance du matériau virtuel a été qualifiée de "dur" trois fois.

La température du matériau virtuel a été qualifiée de "chaude" une fois, et de "froide" deux fois.

Les résultats du QCM pour la deuxième partie de la pré-expérience (dans la réalité) :

La texture du matériau physique a été qualifiée de "granuleux" trois fois.

La consistance du matériau physique a été qualifiée de "dur" trois fois.

La température du matériau physique a été qualifiée de "tiède" trois fois.

Ces résultats montrent que dans un milieu de réalité virtuelle, la texture, la consistance, et la température, sont majoritairement perçues de la même manière par les utilisateurs. Bien que les résultats puissent varier en fonction de l'expérience sensorielle vécue par ceux-ci vis-à-vis d'un même matériau, la justesse des résultats de la deuxième phase de la pré-expérience nous montrent que le système de perception visuo-tactile est bien fonctionnel dans la réalité.

Pour vérifier les hypothèses émises dans le protocole expérimental, nous pouvons dire qu'à partir des résultats de la pré-expérience, nous nous attendons à ce que l'hypothèse numéro 1 soit validée après la

mise en action du protocole expérimental sur un plus grand nombre d'utilisateurs, après avoir été amélioré.

c - Potentielles améliorations du protocole expérimental pour des résultats plus précis

Plusieurs choses pourraient être différentes. Dans le cas où nous restons sur le même système d'expérimentation, nous pourrions modifier le protocole pour que l'utilisateur :

- donne directement les sensations qu'il ressent dans l'environnement virtuel.
- dans la réalité : donne ses sensations avant qu'il touche l'échantillon, et qu'il les redonne après avoir touché l'échantillon (dans le cas où il voit et il touche).

Aussi, lors de la pré-expérience, nous avons demandé aux utilisateurs de parcourir l'environnement selon une règle qui était de se déplacer autour du bâtiment (sur lequel le matériau était appliqué), mais de ne jamais le regarder directement. Le but était de faire le tour de la Casa Rudofsky en la percevant uniquement avec la vision périphérique. Car, d'après Juhani Pallasmaa, « *La vision périphérique nous intègre à l'espace, alors que la vision ciblée nous pousse dehors, nous transformant en simples spectateurs.* » (Juhani Pallasmaa, *Le regard des sens*, p. 14). C'est pour cette raison que nous avons voulu intégrer dans la pré-expérience, le fait que l'utilisateur ne regarde pas directement le matériau ciblé, mais tourne autour en se déplaçant. Ce choix avait été fait dans l'optique que lorsque nous pratiquons des espaces architecturaux, rares sont les moments où nous regardons directement les murs matériaux qui nous entourent. Nous avons une approche plus contextuelle : c'est à dire que notre corps ressent grâce à son expérience, l'ambiance générale qui se dégage des espaces. Mais dans le cas de l'expérience, ce détail pourrait changer pour une

vision maculaire, sans déplacement. Puisqu'avant de mettre en place cette pratique dans la phase de conception architecturale, il nous faut vérifier qu'elle est fonctionnelle. Or, après les avoir soumis au premier QCM, nous les mettrions face à l'échantillon physique du matériau présent sur la Casa Rudofsky. Ce qui induirait de le regarder directement. L'utilisateur pourrait alors se concentrer directement sur le matériau dans l'environnement virtuel pour être dans les mêmes conditions d'observations et ainsi avoir des résultats peut-être plus cohérents.

« L'idée que deux personnes ne peuvent jamais voir exactement la même chose dans des conditions normales est choquante pour certains, car elle implique que les Hommes n'entretiennent pas tous les mêmes rapports avec le monde environnant. » Edward T. Hall, la dimension cachée, chapitre 6

Si nous voulions faire une expérience un peu différente, nous pourrions confronter directement le réel à la réalité virtuelle. Nous pourrions simuler le toucher du mur de l'environnement virtuel en lui faisant toucher le même matériau existant dans la réalité en même temps. Le but serait de questionner l'utilisateur sur ses sensations, pendant qu'il est dans le milieu de réalité virtuelle. Les questions pourraient lui être posées avant et après qu'il touche l'échantillon : l'objectif serait de savoir s'il s'attendait à des sensations différentes au moment de toucher l'échantillon physique du matériau.

Le choix du matériau est important. Soit nous choisissons le même matériau pour les deux environnements, soit nous en prenons deux différents. L'intérêt de choisir le même matériau est de vérifier si l'appréhension visuo-tactile dans un environnement de réalité virtuelle va nous permettre d'identifier les mêmes sensations que celles perçues dans la réalité.

Conclusion :

L'objectif de ce mémoire était de démontrer la fonctionnalité de notre système d'appréhension visuo-tactile envers des matériaux d'architecture dans un milieu de réalité virtuelle, dans le but de concevoir des bâtiments qui offrent une expérience multisensorielle stimulante aux habitants de notre monde.

Pour se faire, il a fallu dans un premier temps expliquer le fonctionnement des sens concernés, ainsi que leur relation dans un processus de perception spatiale. Nous avons ensuite essayé de comprendre à quoi servent les rendus photo-réalistes en 2D dans la phase de conception d'un projet architectural afin de comprendre les limites de cette outil. La même chose a été faite pour les modélisations immersives dans un environnement virtuel. Cette partie était nécessaire pour pouvoir justifier le choix d'un nouvel outil de conception permettant d'intégrer la perception sensorielle à la réflexion architecturale. Enfin, nous avons mis en place un protocole expérimental nous permettant d'évaluer nos capacités perceptives dans un milieu de réalité virtuelle, dans le but de répondre à notre problématique. Malheureusement, nous n'avons pu réaliser qu'une pré-expérience. Celle-ci ne nous a pas apporté autant d'éléments de réponse que ce à quoi nous nous attendions, mais sa mise en place nous a permis de nous rendre compte qu'elle était bien perfectible. Malgré tout, nous avons pu tirer des conclusions, même hypothétiques, des résultats de cette pré-expérience. Ces conclusions sont plutôt positives, car, avec seulement trois personnes ayant effectuées le protocole expérimental, les résultats tendent à montrer que notre système d'appréhension visuo-tactile serait fonctionnel dans un environnement de réalité virtuelle.

En plus d'apporter un nouvel outil pour aider les architectes à concevoir les espaces d'une nouvelle manière, cette information

pourrait être utile à l'univers des jeux vidéo, qui évolue en même temps que les nouvelles technologies. La connaissance de la possibilité de percevoir les espaces grâce à nos sens, dans un milieu de réalité virtuelle, pourrait servir aux game designers : ils seraient ainsi capables de travailler sur de nouvelles stratégies qui nécessiteraient de se servir de nos facultés sensorielles en réalité virtuelle.

Bibliographie :

- [1] Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés. p. 11, Université de Lyon, 2017.
- [2] Edward T. Hall, la dimension cachée, p. 62, ed. Points, 1966 ; Juhani Pallasmaa, Le regard des sens, p. 65, ed. du Linteau, 2010.
- [3] Edward T. Hall, la dimension cachée, p. 76, ed. Points, 1966.
- [4] Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés. p. 12, Université de Lyon, 2017.
- [5] Edward T. Hall, la dimension cachée, p. 83, ed. Points, 1966.
- [6] Edward T. Hall, la dimension cachée, p. 81, p. 85, ed. Points, 1966.
- [7] Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés. p. 9-10, Université de Lyon, 2017.
- [8] Edward T. Hall, la dimension cachée, p. 93, p. 94, p. 95, ed. Points, 1966.
- [9] Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés. p. 10, Université de Lyon, 2017.
- [10] Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés. p. 10-11, Université de Lyon, 2017.
- [11] Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés. p. 10, Université de Lyon, 2017.
- [12] Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés. p. 16, Université de Lyon, 2017.
- [13] Edward T. Hall, la dimension cachée, p. 83, ed. Points, 1966.

- [14] Alain Berthoz, *le sens du mouvement*, p. 15, p. 125, p. 288–289, ed. Odile Jacob, 2013.
- [15] Juhani Pallasmaa, *Le regard des sens*, p. 13–14, p. 20, p. 31, p. 35, p. 41–42, p. 49, p. 68, p. 78, ed. du Linteau, 2010.
- [16] Juhani Pallasmaa, *Le regard des sens*, p. 46, ed. du Linteau, 2010.
(Kent C. Bloomer & Charles W. Moore, Body, *Memory and Architecture*)
- [17] Alexis PALJIC, *Réponse réaliste en réalité virtuelle*, p. 44–45, Sorbonne Université / Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2018.
- [18] Emma Kaidi, *les images de synthèse dans le but de convaincre ou faire comprendre le projet*, p. 182–183, ENSAPLV, 2021.

Peter Zumthor, *Penser l'architecture*, ed. Birkhauser, 2006.

Annexes :

- Fig. 1 : Source : <http://tpe-protheses-jda.e-monsite.com/pages/protheses-bioniques/le-toucher.html>
- Fig. 2 : Source : <https://www.guide-vue.fr/glossaire/macula>
- Fig. 3 : Source : Jessica Mengaptche Lowe, Thèse de doctorat : *Sensations et perceptions visuelles et tactiles de matériaux texturés*, p. 11, Université de Lyon, 2017.
- Fig. 4 : Source : <https://www.mir.no>
- Fig. 5 : Source : <https://www.materiel.net/guide-achat/g9-peripheriques-gaming/5352/>
- Fig. 6 à 16 : Source : travail personnel.

Séminaire de Savoirs des Activités de Projet Instrumentées.

Encadré par : François GUENA, Anne TUSHER et Joaquim SILVESTRE.

