

Apports de la réalité augmentée dans la revue de projets d'architecture

Auteur : Grella, Maxime

Promoteur(s) : Leclercq, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/8460>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

APPORTS DE LA REALITE AUGMENTEE DANS LA REVUE DES PROJETS D'ARCHITECTURE

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade
de master Ingénieur Civil Architecte par Maxime GRELLA

PROMOTEUR: Pierre Leclercq

JURY: Mohammed Anis Gallas
Catherine Elsen
Annabelle Rahhal
Stephane Safin

PRÉSIDENT DU JURY : Pierre Leclercq

Année académique 2018-2019

REMERCIEMENTS

Avant d'entrer dans le cœur de ce travail, je tiens à adresser mes plus profonds remerciements à mon promoteur, Monsieur Pierre Leclercq, pour son expertise, sa disponibilité, ses conseils avisés et sa patience.

Ensuite je tiens à remercier les membres de mon jury, Mesdames Catherine Elsen et Anabelle Rahhal ainsi que Messieurs Mohammed Anis Gallas et Stephane Safin, pour le temps qu'il consacreront à la lecture de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les 15 étudiants ayant accepté de participer à l'expérimentation, ainsi que celles et ceux ayant participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce TFE en y consacrant un peu de leur temps.

Je remercie ma famille et mes amis pour leurs encouragements et leur soutien.

Enfin, un merci tout particulier à Elodie pour sa confiance, sa bonne humeur, ses encouragements, sa relecture et l'ensemble des casquettes qu'elle a pu porter durant toutes ces années.

*« Nulle pierre ne peut être polie sans friction,
nul Homme ne peut parfaire son expérience sans épreuve. »*
-Confucius

L'évolution de l'informatique permet aujourd'hui l'utilisation d'outils puissants et compacts. L'informatique et la technologie se sont installées partout. De notre ordinateur à notre montre, cette ultra connectivité a bouleversé notre vie quotidienne et a vu naître de nouveaux outils avec, à la clé, de nouveaux usages. En particulier, la réalité augmentée est en pleine effervescence. Déjà présente dans les domaines de la médecine ou du jeu vidéo, des solutions liées à la conception et à l'ingénierie ne cessent de se multiplier. À travers ce travail de fin d'études, nous nous proposons d'étudier quel rôle peut jouer ce nouvel outil dans la conception architecturale et, plus particulièrement, dans la revue de projets d'architecture.

Pour ce faire, nous avons décidé de travailler par l'expérimentation. Celle-ci consiste à plonger des concepteurs dans une situation de revue de projet, leur rôle était alors de détecter un maximum d'erreurs volontairement dissimulées dans le projet et d'analyser trois environnements différents : un environnement 2D composé de plans et coupes, un environnement en réalité augmentée et, finalement, un environnement combinant les deux solutions. L'objectif principal est de vérifier si, à travers ces expériences, la réalité augmentée peut se révéler un outil pertinent au support de la revue de projet en architecture. Il s'agit de voir comment elle se positionne par rapport aux deux autres modalités et quel(s) type(s) de fonctionnalité(s) pourrai(ent) enrichir les potentialités actuelles.

TABLE DES MATIÈRES

1.	CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES.....	12
1.1.	Motivations	12
1.2.	Structure du travail.....	13
1.3.	Outils numériques - définition	14
1.4.	Environnement virtuel, environnement augmenté	15
1.5.	Exemples de mise en œuvre des systèmes.....	22
1.5.1.	La réalité augmentée comme outil d'apprentissage	22
1.5.2.	La réalité augmentée comme outil d'assistance.....	23
1.5.3.	La réalité augmentée comme outil de divertissement.....	24
1.5.4.	La réalité augmentée en conception architecturale.....	25
1.6.	Limites actuelles de la technologie	25
1.7.	Objectifs et questions de recherches.....	26
2.	MÉTHODOLOGIE.....	28
2.1.	Le choix du type de RA	30
2.2.	Choix des participants	31
2.3.	Choix des supports de représentation.....	32
2.4.	Composition de l'avant-projet et typologies d'erreurs	34
2.5.	Choix du logiciel de modélisation de l'avant-projet.....	36
2.6.	Choix de l'application mobile	37
2.7.	Présentation du projet.....	40
2.8.	Mise en place des expériences et protocole	43
2.8.1.	L'espace expérimental nécessaire.....	44
2.8.2.	L'analyse par l'observation et l'interview informelle.....	45
2.8.3.	Déroulement type d'un passage	47
2.9.	Réalisation d'une expérience test.....	49
3.	TRAITEMENT DES DONNÉES	50

3.1.	Données disponibles	50
3.2.	Méthodologie de retranscription.....	51
3.2.1.	Définition de la grille de codage.....	51
3.2.2.	Amélioration de la grille de codage	56
3.3.	Bilan des données utilisables	57
4.	RESULTATS	59
4.1.	L'expérience 2D.....	60
4.1.1.	Discussion des résultats de la situation 2D.....	65
4.2.	L'expérience en réalité augmentée	68
4.2.1.	Discussion des résultats de la situation en RA.	71
4.3.	L'expérience Mixte	74
4.3.1.	Discussion des résultats de l'expérience mixte	77
4.4.	Discussion générale.....	80
5.	CONCLUSION	83
5.1.	Limites rencontrées	84
5.2.	Perspectives d'améliorations, pour aller plus loin.....	85
6.	RÉFÉRENCES.....	86
6.1.	Bibliographie	86
6.2.	webographie	90
7.	ANNEXES	91
7.1.	Enoncé de la mise en situation 2D	91
7.2.	Enoncé de la mise en situation RA	92
7.3.	Enoncé de la mise en situation mixte.....	93
7.4.	Plan du projet.....	95
7.5.	Coupe du projet	96
7.6.	Exemple de captures de la maquette numérique en RA.....	96
7.7.	Grille de prise de notes	97
7.8.	Grille de codage	98

7.9.	Accord de confidentialité.....	111
7.10.	Scan des plans des participants	112

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Le continuum Réalité-Virtualité (Milgram, 1996)	15
Figure 2 : Représentation d'un système de type « Optical see-through » (Silva, 2003). ..	18
Figure 3 : Masque de réalité augmentée Hololens développé par Microsoft (Microsoft)	18
Figure 4 : A gauche, Système Virtual Retina (Vivegnis, 2017). A droite, Système virtual retina de l'Université de Washington (Silva, 2003)	19
Figure 5 : Système Video See-Trough (Milgram, 2003)	19
Figure 6 : Système Monitor-based (Milgram, 2003) (A gauche). Exemple de système au moyen d'une tablette numérique. (Apple).....	20
Figure 7 : Exemple d'un dispositif de projector-Display. Il s'agit sur l'illustration d'un bac à sable en réalité augmentée (Vivegnis, 2017).....	20
Figure 8 : A gauche, la maquette historique de la ville. A droite, une maquette du musée augmentée.....	23
Figure 9 : a) Salle d'opération intégrant des dispositifs en RA permettant de voir l'anatomie du patient en temps réel. B) Reconstruction des vertèbres avant une opération. c) Affichage de données en RA permettant le placement d'une vis vertébrale. (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018).....	23
Figure 10 : Simulation d'opération de la cataracte avec un système RA à retour haptique (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018).	23
Figure 11 : Exemple d'utilisation du système MiRA d'Airbus (Airbus, 2019).	24
Figure 12 : Présentation du jeu Minecraft RA lors de la WWDC 2019 (Apple).....	24
Figure 13 : Projection interactive de la maquette 3D (Calixte, Leclercq, 2017).....	25
Figure 14 : Exemple du tracker universel fourni avec l'application (Augment, 2019)	38
Figure 15 : Tableau des solutions logicielles comparées.....	39
Figure 16 : Ecran principale de visualisation (Photo de l'auteur).	40
Figure 17 : Plan du projet localisant (en rouge) les erreurs à détecter.....	41
Figure 18 : Coupe longitudinale du projet.....	42
Figure 19 : Quelques vues 3D du projet.....	42
Figure 20 : A gauche, le poste 2D, à droite, le poste RA (Photos de l'auteur).	44
Figure 21 : Plan schématique de l'espace expérimental.....	45
Figure 22 : Exemple de la grille d'analyse utilisée.....	47
Figure 23 : Exemple d'un passage – A gauche le point de vue de l'observateur. A droite le point de vue du participant. En bas, le timecode.	50

Figure 24 : Exemple d'une partie de l'encodage réalisé.	51
Figure 25 : Tableau synthétique reprenant l'ensemble des types d'erreurs.	53
Figure 26 : Tableau de répartition des expériences.....	59
Figure 27 : Tableau récapitulatif des expériences 2D	60
Figure 28 : Tableau de répartition des différents types d'erreurs	61
Figure 29 : Tableau reprenant l'ordre d'apparition des erreurs.....	61
Figure 30 : Tableau des paramètres complémentaires étudiés.....	62
Figure 31 : Exemples d'annotations textuelles réalisées.....	63
Figure 32 : Graphique du déroulé temporel de l'expérience en 2D.....	64
Figure 33 : Tableau récapitulatif de l'analyse temporelle.....	66
Figure 34 : tableau récapitulatif de l'analyse temporelle en RA	68
Figure 35 : Tableau récapitulatif du nombre d'erreurs en RA.....	69
Figure 36 : Tableau récapitulatif de l'ordre d'apparition des erreurs en RA.....	69
Figure 37 : Tableau récapitulatif des paramètres complémentaires	70
Figure 38 : Graphique du déroulé temporelle de l'expérience en RA	71
Figure 39 : Tableau récapitulatif de l'analyse temporelle de l'expérience mixte.	74
Figure 40 : Tableau récapitulatif du nombre d'erreur pour l'expérience mixte.....	74
Figure 41 : Tableau de l'ordre d'apparition des erreurs pour l'expérience mixte.....	75
Figure 42 : Tableau récapitulatif des paramètres complémentaires de l'expérience mixte.	75
Figure 43 : Graphique du déroulé temporel de l'expérience mixte.....	76
Figure 44 : Tableau récapitulatif de l'analyse temporelle en RA+2D	77
Figure 45: Tableau récapitulatif des données temporelles des trois expériences.....	80

1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES

1.1. MOTIVATIONS

À l'heure actuelle, le numérique s'est installé partout : de nos écrans de télévision au tableau de bord de nos voitures, en passant par nos agendas et nos montres. Cette révolution du 21^e siècle a donc bouleversé la vie quotidienne de millions de personnes, mais également le monde professionnel, en s'intégrant dans ce milieu et en modifiant les habitudes de travail. Les métiers de conception n'échappent pas à cette tendance, notamment, l'architecte qui fut et est toujours impacté par ce changement (Elsen, Jancart, Stals, 2017). Des tables à dessin et du crayon, ce dernier laisse place aujourd'hui aux ordinateurs, tablettes numériques et stylets. Les solutions de conception, de dessin et de plateforme ne cessent de se multiplier. Il devient même difficile de s'adapter à ce mouvement tant la variété et les possibilités de l'offre sont larges. Il en est de même pour la représentation 3D essentielle au travail du concepteur : les imprimantes 3D, découpeuses laser, ou fraiseuses numériques remplacent petit à petit les paires de ciseaux et les lattes ; les maquettes physiques cèdent, aujourd'hui, de plus en plus leur place aux maquettes numériques.

Ces dernières, souvent représentées à l'aide d'un écran d'ordinateur, ont aujourd'hui une multitude d'autres outils permettant de représenter les modèles dans différents environnements. Les fabricants de projecteurs 3D, de masques de réalité virtuelle, augmentée, nous promettent une meilleure immersion en nous permettant d'améliorer la visualisation pour profiter de plus interactions avec les modèles conceptuels.

Durant nos études d'ingénieur architecte, nous avons eu l'occasion de tester et expérimenter différents outils innovants permettant de concevoir autrement. De logiciels de modélisation paramétriques, aux plateformes de conception collaborative distante Sketsha, nombreuses furent les solutions testées lors d'ateliers de conception et autres projets. Parfois, le ressenti d'une réelle plus-value liée à l'utilisation de ces outils était difficile à percevoir. Cependant, l'expérimentation et l'apprentissage en résultant étaient toujours un facteur nous motivant pour en essayer un nouveau.

Il fut assez naturel de continuer cette exploration technologique, à travers ce travail, en traitant la question de l'utilité de ces nouvelles plateformes de visualisation 3D. En effet,

à l'heure actuelle, ces outils numériques jouent principalement le rôle de nouveaux moyens de communication entre les concepteurs et leurs clients. Ainsi, souvent, nous pouvons faire l'expérience d'une visite virtuelle d'un appartement à vendre ou d'une application sur smartphone permettant de visualiser un futur produit que nous aurions envie d'acheter.

Cependant, tous ces outils à la disposition des concepteurs ne sont pas encore systématiquement utilisés dans le processus de conception (Elsen, Jancart, Stals, 2017). Projeter une maquette virtuelle dans un espace physique, explorer une volumétrie à l'aide d'un masque de réalité virtuelle n'est pas encore courant, ni en agence d'architecture, ni en milieu académique.

Est-ce que ces outils peuvent apporter une réelle plus-value dans le processus de conception ? Permettent-ils de mieux se représenter un modèle ? Comprenons-nous mieux les éléments architecturaux à travers ces outils ?

Devant ce très vaste éventail de possibilités et les innombrables questions qui en découlent, nous explorerons une des nombreuses plateformes numériques et tenterons de dégager des pistes de réponses quant à la réelle utilité de les utiliser comme outils d'assistance à la conception et de revue d'un projet à un stade d'avant-projet.

1.2. STRUCTURE DU TRAVAIL

Ce travail sera découpé en quatre sections. La première fera le point sur la revue de la littérature et étudiera les différents moyens de visualisation d'un projet à l'aide des nouveaux outils numériques, notamment la réalité virtuelle et augmentée. Nous détaillerons quelques exemples d'implémentation de ces outils et décrirons certaines expériences réalisées dans un cadre similaire à celui de notre travail. Nous y dégagerons donc les avantages et freins inhérents à ces technologies. Cette analyse de la littérature nous permettra de dégager nos questions de recherche et de donner la ligne directrice de notre travail.

Ensuite, notre travail se basant sur une étude expérimentale, la deuxième partie sera consacrée à la description de la méthodologie appliquée. Cette description se veut chronologique. Ainsi, nous y détaillerons le chemin parcouru jusqu'à la réalisation des expériences en passant par l'explication du protocole d'application.

La troisième partie de ce travail sera consacrée aux traitements des données. Nous détaillerons notre méthodologie appliquée et passerons en revue l'ensemble des choix justifiant notre angle d'analyse.

Enfin, la quatrième et dernière partie du corpus sera consacrée aux résultats des expériences. Nous les détaillerons et les analyserons ensuite en tentant de répondre à nos questions de recherche. Nous concluons par un retour d'expérience ainsi qu'un mot sur des pistes d'extension.

1.3. OUTILS NUMERIQUES - DEFINITION

Depuis la naissance du premier microprocesseur en 1971, la puissance de calculs des machines croît exponentiellement. Selon la théorie de Gordon Moore, cette puissance double tous les deux ans. Malgré la possible fin de cette théorie en 2020, les puissances de calculs sont telles que le smartphone que l'on possède tous dans notre poche nous permet d'effectuer des milliards d'opérations par seconde. Cette puissance accessible a permis de développer des outils de plus en plus performants dans pratiquement l'ensemble des domaines utilisant un ordinateur. Un médecin peut réaliser une échographie 3D en temps réel, un archéologue peut, au moyen de scanners performants, définir l'âge d'un objet récemment découvert, un ouvrage ancien peut être scanné et informatisé en quelques minutes seulement, un pilote de ligne peut s'entraîner à faire un atterrissage d'urgence dans son centre de formation et enfin, un architecte peut se balader dans son bâtiment avant même qu'il ne soit construit.

Tous ces nouveaux outils nous amènent à redéfinir cette notion. De la signification du marteau du bricoleur à la tablette numérique de l'architecte, le terme « outil » a évolué pour désigner aujourd'hui une variété d'objets réels ou virtuels nouveaux.

Selon le Trésor de la Langue Française¹, référence de la linguistique française, le terme « outil » est défini comme « *Objet fabriqué, utilisé manuellement, doté d'une forme et de propriétés physiques adaptées à un procès de production déterminé et permettant de transformer l'objet de travail selon un but fixé* ».

Le sens figuré du terme est plutôt défini comme « *Moyen; ce qui permet d'obtenir un résultat, d'agir sur quelque chose.* »

¹ Trésor de la langue française, Consulté le 30 décembre 2018 à l'adresse : <http://stella.atilf.fr/Dendien/scripts/tlfiv5/advanced.exe?8;s=1921876095;>

L'encyclopédie Universalis² le définit comme étant « *Prolongement de la main de l'Homme,...* »

Le terme « numérique », quant à lui, est défini comme ce « *Qui concerne des nombres, qui se présente sous la forme de nombres ou de chiffres, ou qui concerne des opérations sur des nombres...qui désigne ou représente des nombres ou des grandeurs physiques au moyen de chiffres...*

L'intégration des deux termes peut donc être résumée comme un moyen permettant de produire, réaliser un travail et d'aboutir à un résultat aux moyens d'un système utilisant des nombres et des opérations. Cette définition est typiquement celle d'un processus relié à un moyen de visualisation tel qu'un écran.

Dans notre cas, nous pouvons préciser cette définition comme le moyen, pour le concepteur, de réaliser une tâche grâce à des nombres ou des opérations sur des nombres qui donnent lieu à une représentation virtuelle.

1.4. ENVIRONNEMENT VIRTUEL, ENVIRONNEMENT AUGMENTE

Un environnement virtuel est un environnement exclusivement créé sur ordinateur. Il permet d'amener un utilisateur dans un monde entièrement virtuel. Celui-ci pourra alors interagir dans cet environnement. Toutes ses actions n'auront aucune influence avec un environnement réel. Comme décrit par Milgram en 1996, le continuum Réalité-virtualité (figure 1) place la réalité virtuelle à une extrémité de ce continuum. En effet, comme décrit plus haut, aucune connexion avec l'espace réel n'est possible avec cette technologie. Le but est donc de « tromper » l'utilisateur et de l'emmener dans un monde imaginaire. Il s'agit de duper le cerveau pour lui faire croire que nous nous trouvons dans un environnement réel.

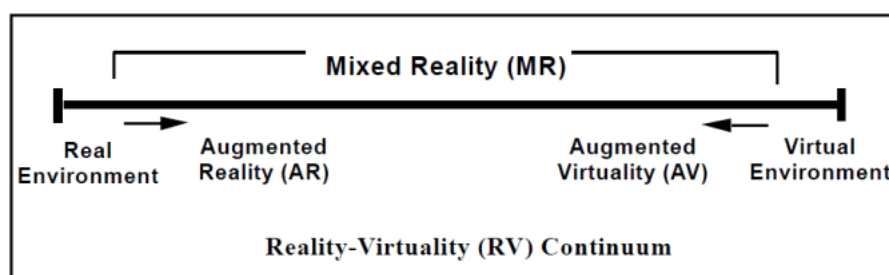


Figure 1 : Le continuum Réalité-Virtualité (Milgram, 1996)

² Encyclopédie Universalis, consulté le 30 décembre 2018 à : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/outil/>

Principalement utilisée avec des visiocasques (Oculus rift, Sony VR, HTC vive), la réalité virtuelle se tourne essentiellement vers le jeu vidéo ou le divertissement (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018). Mais, nous la retrouvons également dans l'industrie comme moyen d'apprentissage, de conception ou d'aide à la compréhension. En effet, pour mieux comprendre des phénomènes complexes, la réalité virtuelle peut être un support permettant, grâce à son rendu visuel et interactif, un meilleur accès à l'information (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018). Ainsi, c'est le cas de l'archéologue qui pourrait étudier un bâtiment aujourd'hui disparu, mais reconstitué numériquement. Des simulations numériques peuvent également imiter les fonds marins. Les océanographes peuvent ainsi visualiser des informations généralement inaccessibles.

La réalité augmentée est aujourd'hui également utilisée comme moyen de communication. En effet, la réalité virtuelle est considérée comme un bon outil d'aide à la vente ou de mise en valeur de produits.

La réalité virtuelle s'invite également dans les domaines de l'architecture, de l'ingénierie et du design (Calixte, Leclercq, 2017). Les solutions permettant d'immerger et d'isoler un concepteur dans un modèle sont nombreuses. Ces immersions auparavant réalisées grâce à des maquettes physiques se montrent aujourd'hui moins coûteuses, plus flexibles et plus rapides à réaliser (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018). Cependant, la complexité des projets, les normes strictes de performances énergétiques, les contraintes structurelles, économiques ou législatives transforment la conception architecturale en une discipline pluridisciplinaire (Calixte, Leclercq, 2017). Cette pluridisciplinarité et cette complexité poussent les différents intervenants à collaborer et à optimiser le travail collectif.

Les dispositifs immersifs tels que les casques de réalité virtuelle ont une vocation d'utilisation individuelle. Il est donc difficile pour deux concepteurs de collaborer lorsqu'ils sont plongés dans leur environnement virtuel. Comme le signale Calixte et Leclercq (2017), ces systèmes immersifs créent un décalage entre la nécessité de collaborer et l'isolement d'un dispositif de réalité virtuelle.

Même si elle partage des caractéristiques communes avec la Réalité Virtuelle³, la Réalité Augmentée⁴ se distingue par une caractéristique principale : l'environnement dans lequel évolue l'utilisateur n'est plus virtuel, mais réel. L'utilisateur interagit donc en temps réel entre son environnement réel et virtuel. La RA permet de venir enrichir un environnement réel par l'ajout d'informations virtuelles. Les données ajoutées sont principalement visuelles, mais elles peuvent également être sonores, olfactives ou haptiques (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018).

Nombreux scientifiques ont tenté de donner une définition courte de la RA. À l'instar de Ronald T Azuma qui propose de la définir de la manière suivante (Azuma, 1997) :

« La réalité augmentée est définie comme l'ensemble des applications vérifiant les trois propriétés suivantes :

- *La combinaison du réel et du virtuel*
- *L'interaction en temps réel.*
- *L'intégration du réel et du virtuel. »*

Une notion importante de cette définition est l'interaction en temps réel. En effet, comme le montre le continuum de Milgram, la RA fait partie de la réalité mixte qui définit toutes les plateformes dans lesquelles il existe des interactions entre le réel et le virtuel (Milgram, 1996). On y retrouve également la virtualité augmentée. Elle consiste en une plateforme virtuelle dans laquelle des objets réels physiques viennent interagir avec cet environnement. La mise en place d'un tel système est cependant complexe (Milgram, 1996).

Un système de RA nécessite une calibration afin d'obtenir une superposition parfaite entre l'environnement réel et virtuel. Comme expliqué plus haut, le développement informatique et l'accessibilité à une puissance de calculs ont permis une démocratisation et un véritable bond de cette plateforme (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018). De grandes sociétés internationales s'y intéressent et ont développé différents produits, nous pouvons citer, notamment : Microsoft et son capteur Kinect en 2010, Google avec ses Google glass en 2013 (projet finalement abandonné, l'objet étant considéré comme trop intrusif). Microsoft en 2016, avec son casque Hololens qui sort cette année sa deuxième itération, et enfin sur le plan software nous pouvons mentionner Apple qui ne cesse

³ Le terme Réalité Virtuelle sera abrégé dans la suite de ce travail en RV

⁴ Le terme Réalité Augmentée sera abrégé dans la suite de ce travail en RA

d'améliorer ARkit, son kit de développement permettant d'intégrer de la RA dans leurs terminaux mobiles (Smartphones et tablettes).

Toutes ces technologies utilisent des technologies d'affichage différentes, à l'heure actuelle, nous en distinguons cinq (Silva, 2003) :

- **L'Optical See-Trough**

Généralement utilisé à l'aide d'un casque ou de lunettes transparentes, ce dispositif permet à l'utilisateur de continuer de voir son environnement réel à travers des verres transparents. L'information virtuelle augmentée est alors projetée sur ces verres et vient se superposer au monde réel. Cette technologie est représentée à la figure 2 et offre une vision naturelle des deux types d'environnement. C'est ce type de dispositif qu'a choisi Microsoft pour le développement de son casque Hololens (figure 3) ou encore Google avec ses GoogleGlass. Les avantages de ce dispositif sont : une bonne fluidité lors de l'ajout d'informations et la liberté de mouvements de l'utilisateur. Cependant, les technologies actuelles rencontrent quelques limites, notamment un faible champ de vision, un recalage des éléments difficiles au vu du mouvement de la tête et un contraste d'affichage ne permettant pas d'obtenir des images de bonne qualité.

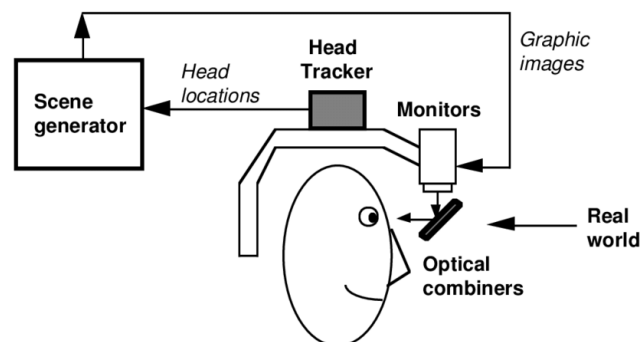


Figure 2 : Représentation d'un système de type « Optical see-through » (Silva, 2003).



Figure 3 : Masque de réalité augmentée Hololens développé par Microsoft (Microsoft⁵)

⁵ Microsoft, Description du masque hololens, consulté le 10 août 2019 à : <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

- **Le « Virtual-Retina »**

Ce système proche du précédent, inventé à l'université de Washington, projette l'image virtuelle directement sur la rétine de l'œil humain via un faisceau lumineux. L'utilisateur a donc l'illusion de voir l'image sur un écran transparent le séparant de quelques centimètres alors que celle-ci est projetée directement sur sa rétine. L'avantage de cette technologie est sa très bonne résolution d'affichage et son angle de vue très large.

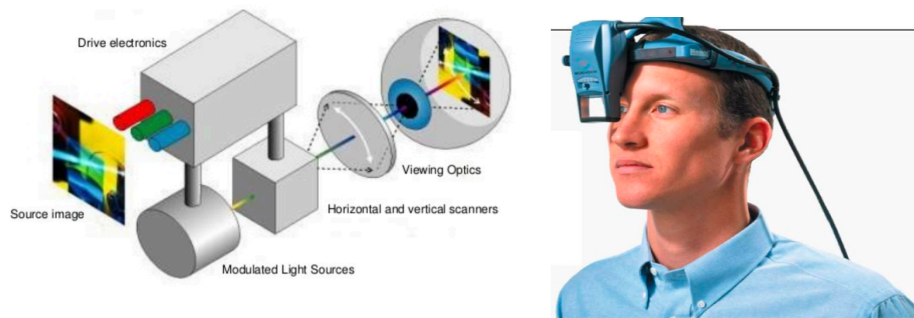


Figure 4 : A gauche, Système Virtual Retina (Vivegnis, 2017). A droite, Système virtual retina de l'Université de Washington (Silva, 2003)

- **Le Video See-Trough**

Ce système utilise un casque similaire au casque de RV : une caméra filme l'environnement réel, et la combinaison du réel et du virtuel est alors projetée sur les écrans des lunettes (Figure 5). La grande différence avec le système Optical see-through est que l'environnement réel n'est plus perçu naturellement, mais projeté sur des écrans. Ainsi, ce système permet une meilleure superposition des deux mondes et s'affranchit des contraintes de recalage de la première solution, mais elle perd tout l'intérêt du ressenti naturel de l'espace réel.

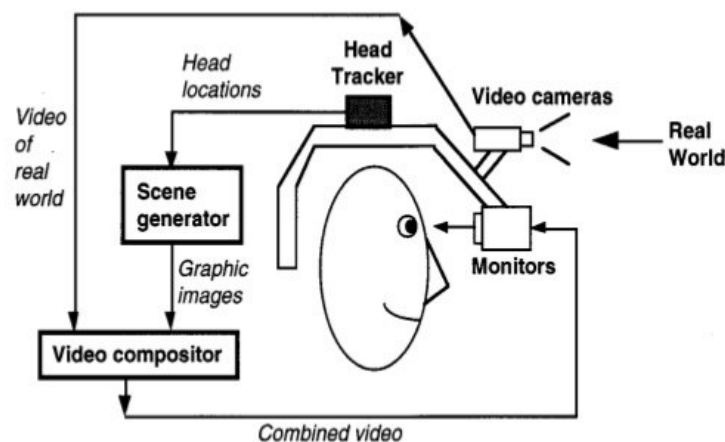


Figure 5 : Système Video See-Trough (Milgram, 2003)

- **Le Monitor-Based**

Ce système est une variante du précédent. En effet, une caméra filme l'environnement réel et l'ordinateur fusionne les deux environnements. L'ensemble est ensuite affiché sur un écran d'ordinateur, une tablette ou projeté à l'aide d'un projecteur. Ce dispositif décrit comme le moins difficile à implémenter (Silva, 2003), permet de s'affranchir des problèmes de recalage, de contraste d'affichage (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018) et est aussi généralement plus démocratique. Des systèmes collaboratifs permettant d'observer un même objet depuis plusieurs écrans déportés différents commencent à voir le jour (Figure 6).

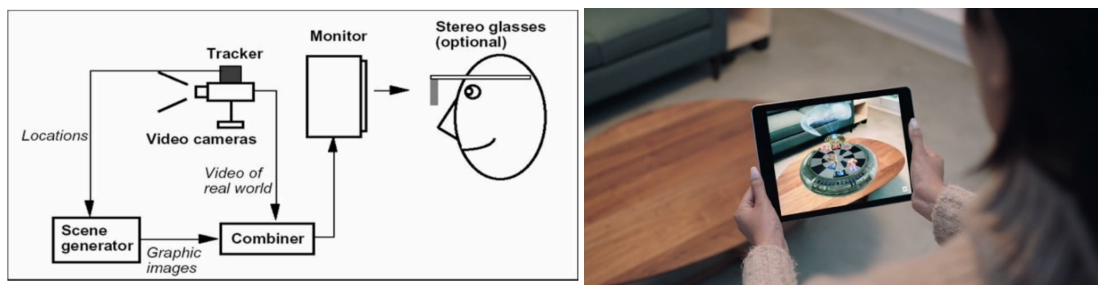


Figure 6 : Système Monitor-based (Milgram, 2003) (A gauche). Exemple de système au moyen d'une tablette numérique. (Apple)

- **Le projector display**

Ce système ressemble au dispositif précédent. Cependant, l'environnement virtuel n'est plus affiché sur un écran, mais directement projeté sur des objets réels. Ses avantages sont qu'il permet une vue naturelle de l'environnement réel et surtout il convient pour le multi-users. En effet, aucun dispositif personnel ne doit être porté par le ou les utilisateurs. Néanmoins, ce dispositif nécessite un calage parfait avec les objets réels. (Vivegnis, 2017).



Figure 7 : Exemple d'un dispositif de projector-Display. Il s'agit sur l'illustration d'un bac à sable en réalité augmentée (Vivegnis, 2017)

La description de ces cinq systèmes nous permet de dresser le tableau synthétique suivant :

Type de système	Support de fonctionnement	Prix	Caractéristiques principales
Optical See-Trough	Nécessite un masque ou un casque du type Hololens, LeapMotion ou Aryzon.	Coûtant généralement quelques milliers on trouve aujourd'hui des produits sous la barre des 1000€.	• Liberté des mouvements. • Contraste limité. • Champ de vision limité. • Recalage compliqué dû aux mouvements de la tête. • Généralement application propriétaire.
Virtual-Retina	Nécessite des lunettes sur lesquelles le projecteur rétinien est fixé.	Inconnu.	• Stade de prototype uniquement.
Video See-Trough	Nécessite un masque ou casque. L'écran de projection est cependant opaque.	Peut coûter de quelques centaines d'euros à plusieurs milliers d'euros.	• Liberté des mouvements. • Perte du côté naturel de l'environnement réel. • Très bon recalage du réel et du virtuel. • Champs de vision est en fonction du masque.
Monitor-Based	Nécessite un écran déporté tel qu'un écran d'ordinateur, une tablette ou un smartphone.	Coûte le prix d'un écran d'une tablette + le coût du logiciel.	• Accessible. • Performance variable en fonction du software. • Grand choix d'applications. • Évolutif. • Perte de la liberté de mouvements.
Projector display	Nécessite un projecteur calibré à une surface physique de projection.	Nécessite l'achat d'un projecteur. Varie de quelques centaines à plusieurs milliers d'euros.	• Liberté de mouvements. • Calibrage nécessaire. • Système multi-user. • Bonne résolution d'affichage.

1.5. EXEMPLES DE MISE EN ŒUVRE DES SYSTEMES

Les domaines dans lesquels la réalité augmentée a déjà été mise en œuvre sont multiples : l'apprentissage scolaire, la conception, l'ingénierie, l'art, le jeu, la navigation, la médecine n'en sont que quelques exemples. Tous ces domaines nous montrent la portée de ces nouveaux outils. Dans le cadre de ce point théorique, nous ne développerons que quelques exemples permettant de présenter ces principales fonctionnalités. Nous aborderons ainsi quatre thématiques : l'apprentissage, l'assistance, le jeu et la conception architecturale.

1.5.1. LA REALITE AUGMENTEE COMME OUTIL D'APPRENTISSAGE

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'apprentissage est un domaine dans lequel nous pouvons observer un intérêt pour la réalité augmentée. Certaines études ont révélé un aspect positif de l'utilisation de la RA comme ressources pédagogiques (Kaufmann et al., 2002). Des recherches fondamentales compilées par Anastassova et al (2007) montrent un certain enthousiasme. En effet, les apprenants considèrent la RA comme utile dans la majorité des cas d'étude. Cependant, la RA ne donne pas de signe quant à l'augmentation de la motivation d'apprentissage.

À titre d'exemple pédagogiques, nous pouvons citer celui de l'interactivité dans les musées. En effet, l'accessibilité technologique actuelle permet intégrer des systèmes interactifs offrant aux visiteurs d'en apprendre davantage sur une œuvre ou d'interagir virtuellement avec des objets généralement inaccessibles. Des chercheurs ont mené une étude au musée d'histoire de Nantes. Celle-ci consistait en l'augmentation d'une maquette physique au moyen d'un système « Projector display », et d'un écran interactif permettant de sélectionner des scénarios retraçant l'histoire de la ville. La compréhension et l'émulation de groupe autour de la maquette sont deux observations qui caractérisent les avantages de cette expérience (Hervy et al, 2014).

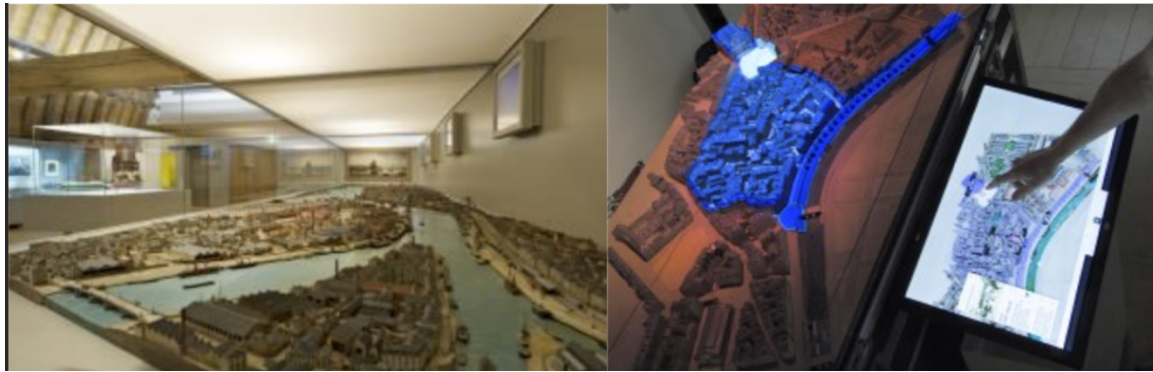


Figure 8 : A gauche, la maquette historique de la ville. A droite, une maquette du musée augmentée

1.5.2. LA REALITE AUGMENTEE COMME OUTIL D'ASSISTANCE

La médecine figure parmi les domaines précurseurs où cette technologie fut implantée. C'est le cas de la chirurgie assistée par ordinateur où les systèmes de type Optical see-through ou Projector display jouent principalement le rôle de soutien à la navigation et à l'affichage de données essentielles à l'opération (Arnaldi, 2018). Toujours dans ce secteur, la RA sert également d'outil d'aide à la formation et à la préparation de la planification d'une intervention. En effet, les techniques d'imagerie médicale actuelles permettent de générer des modèles 3D complexes utilisables comme appuis à l'intervention. De plus, les chirurgiens utilisent cette technologie comme moyen d'entraînement, un exemple est le domaine de la microchirurgie (figure 10).

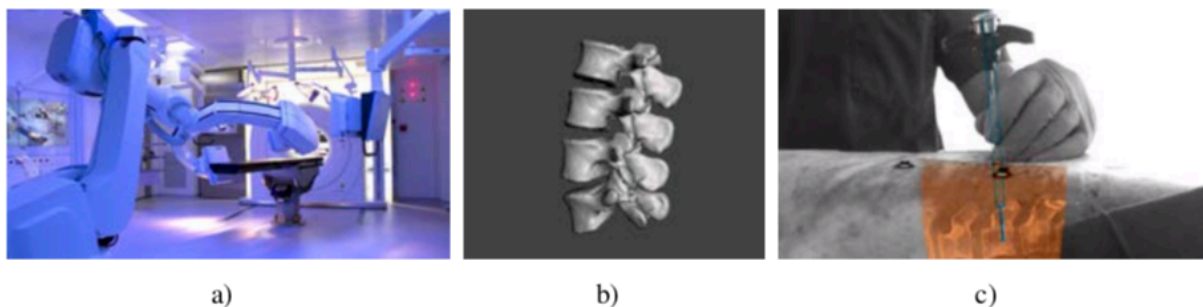


Figure 9 : a) Salle d'opération intégrant des dispositifs en RA permettant de voir l'anatomie du patient en temps réel. b) Reconstruction des vertèbres avant une opération. c) Affichage de données en RA permettant le placement d'une vis vertébrale. (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018)



Figure 10 : Simulation d'opération de la cataracte avec un système RA à retour haptique (Arnaldi, Guitton, Moreau, 2018).

Un autre exemple est celui de l'assistance à la maintenance et l'application de protocole d'inspection. Le fleuron de l'aviation Airbus a ainsi développé MIRA, une application en RA qui a pour but de vérifier le bon placement de milliers de pièces d'assemblage de leurs avions. Les fonctionnalités de MIRA ne se limiteront bientôt plus à l'inspection des travaux finis, mais seront un outil d'aide au montage permettant à un opérateur d'être guidé tout au long du processus en recevant des informations contextuelles localisées.



Figure 11 : Exemple d'utilisation du système MiRA d'Airbus (Airbus, 2019).

1.5.3. LA REALITE AUGMENTEE COMME OUTIL DE DIVERTISSEMENT

Les créateurs de jeux vidéo explorent également les possibilités qu'offre la réalité virtuelle. En effet, ils perçoivent cette technologie comme un nouveau souffle dans le domaine. Les consoles Nintendo Wii, Xbox 360 et son capteur Kinect, ou encore la Playstation Move ont permis de faire converger le jeu physique et le jeu virtuel. La RA s'attaque également à la mobilité. Ainsi, un exemple est l'éditeur Mojang, créateur du célèbre jeu Minecraft, qui a présenté récemment la version RA du jeu. Grâce au smartphone et à la tablette, l'environnement Mine Craft interagit avec l'environnement réel en intégrant celui-ci, ainsi votre table du salon devient une plateforme de jeu. Il s'agit également d'un des premiers jeux en réalité augmentée multijoueurs sur appareils mobiles.



Figure 12 : Présentation du jeu MineCraft RA lors de la WWDC 2019 (Apple)

1.5.4. LA REALITE AUGMENTEE EN CONCEPTION ARCHITECTURALE

Notre exemple concerne un cas d'étude utilisant le concept de « Interactive projection mapping » basée sur un système du type « projector display » comme moyen de communication du projet d'architecture. Des recherches menées par le laboratoire du LUCID de l'Université de Liège proposent d'utiliser une maquette physique comme support de projection sur laquelle il est possible d'effectuer des annotations en temps réel (figure 13). Le dispositif est composé de plusieurs éléments : une maquette physique fixe peinte en blanc, un projecteur préalablement aligné avec la maquette physique et, dans ce cas, d'une tablette graphique déportée sur laquelle un des présentateurs (à gauche sur l'image) peut dessiner en temps réel grâce à l'application Skesha des informations se visualisant alors sur la maquette physique.



Figure 13 : Projection interactive de la maquette 3D (Calixte, Leclercq, 2017)

L'examen de cette étude permet d'émettre les observations suivantes : la compréhension de ce projet aux formes complexes est clairement facilitée par cette plateforme interactive augmentée (Calixte, Leclercq, 2017). En effet, l'ensemble des membres du jury présents ont assuré avoir bien suivi et compris la présentation. De plus, certains ayant assisté à des présentations précédentes de ce projet ont confirmé que ce format avait aidé à la compréhension comparativement aux documents 2D. Cette étude a également relevé des points d'attention : un bon calibrage du dispositif est primordial et l'ombre générée par le modèle physique 3D est un problème inhérent à ce type de technologie. (Calixte, Leclercq, 2017).

1.6. LIMITES ACTUELLES DE LA TECHNOLOGIE

Comme décrit ci-avant, nous voyons que la RA touche des domaines variés et les résultats des expérimentations semblent promettre un bel avenir à cette technologie. Cependant,

nous ne pouvons pas encore considérer que cette technologie est mature (Arnaldi, Guitton et Moreau, 2018). Elle fait, en effet, face à plusieurs défis technologiques :

- Le champ de vision limité de ces outils. En effet, un casque de RA doit idéalement se faire oublier. Le système visuel humain ne devrait donc pas pouvoir percevoir ces différences entre les signaux visuels. Cependant, les casques actuels ne couvrent qu'au mieux un champ de 100-110°.
- La résolution d'affichage. Plus l'œil humain est proche d'un écran, plus il est capable de distinguer deux pixels juxtaposés. Les solutions de types casques ou masques déportent l'écran de visualisation à seulement quelques centimètres de l'œil. Les résolutions d'affichage à atteindre afin de proposer une solution totalement imperceptible ne sont, aujourd'hui, pas encore envisagées.
- La capacité de calcul graphique. Même si la puissance graphique disponible à l'heure actuelle est conséquente, la nécessité d'une haute résolution, d'une haute fréquence d'affichage sous-entend un appareillage plus conséquent que les quelques centimètres carrés disponibles dans un casque de réalité augmentée.
- La mobilité. La capacité de pouvoir se mouvoir est un élément essentiel pour pouvoir profiter de cette technologie. Ce mouvement implique donc une autonomie et une capacité de calcul élevées non disponibles à ce jour. Les tablettes numériques permettent, cependant, de pallier une partie de ces problèmes.

1.7. OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHES

Nous l'avons vu dans les sections précédentes : la réalité augmentée possède une variété très large de domaines dans lesquels elle est implantée. Cependant, le nombre d'expériences dans le domaine de la conception architecturale n'est pas aussi fourni. Souvent à l'aide de sa technologie voisine, la RV, elle traitait principalement la question de l'utilisation de ces outils comme nouveau moyen de communication. Il nous a donc semblé légitime d'explorer ses possibilités non plus comme moyen de communication, mais comme outil d'aide à la conception et plus précisément comme aide à la revue de projet. L'objectif principal est de vérifier si la réalité augmentée peut se révéler être un outil pertinent au support de la revue d'avant-projet en architecture. Il s'agit de voir comment elle se positionne par rapport aux méthodes classiques que nous connaissons telles que la relecture de plans et coupes et quel(s) type(s) de fonctionnalité(s) pourrai(ent) enrichir les potentialités actuelles.

Plus particulièrement, nous tenterons d'apporter une réponse aux questions suivantes :

- La réalité augmentée est-elle un outil pertinent dans la revue d'avant-projets d'architecture ?
- La RA apporte-t-elle un meilleur niveau de compréhension et d'analyse d'un projet d'architecture par rapport aux méthodes dites « classiques » ?
- La quantité d'informations supplémentaires apportées par l'outil est-elle vectrice d'une analyse d'autres facteurs n'apparaissant pas habituellement ?

2. METHODOLOGIE

Après avoir effectué un travail bibliographique et devant le peu de données concrètes exploitables actuellement sur la RA en revue de projet, nous avons décidé de travailler par l'expérimentation. Ainsi, dans cette section du travail, nous allons décrire l'ensemble de notre réflexion permettant d'arriver à la réalisation de notre expérience ayant pour but de répondre aux questions de recherche. Afin de baliser ce cheminement, nous nous sommes basé sur des expériences de mise en situation déjà réalisées dans le domaine de la conception architecturale et l'analyse d'actions collaboratives. Nous avons également sélectionné deux cours dispensés à l'Université de Liège nous permettant de valider notre démarche scientifique.

L'ensemble des références utilisées pour soutenir cette méthodologie sont :

- Le cours d'Analyse des Processus de Conception (Leclercq, Calixte, 2017) dispensé aux étudiants suivant le Master d'ingénieur architecte à l'Université de Liège. Le cours consiste en l'étude d'une session de conception collaborative rapide de 120 minutes. Trois concepteurs doivent produire une esquisse de l'aménagement d'un magasin. Trois observateurs regardent les concepteurs durant leur travail et prennent notes de plusieurs paramètres : leurs actions, leurs interactions, l'évolution du projet au cours du temps, les échanges verbaux et non verbaux, l'utilisation des outils... Ensuite, l'ensemble de l'équipe (concepteurs et observateurs) réalise l'analyse de son propre travail. Les équipes encodent par la suite, au moyen de grilles de codage et de retranscription préétablies, l'ensemble des observations. Finalement s'en suit une analyse des données récoltées au moyen de formalismes générés à partir du logiciel Common Tools, une application web permettant de croiser dynamiquement des données multimodales. Cette expérience à laquelle j'ai participé fut une base très utile pour ce TFE. En effet, je fus familiarisé avec cette méthode et j'ai pu en retirer les éléments me semblant intéressants pour la réalisation de l'expérience au cœur de ce travail.
- Le cours d'Introduction à la recherche (Leclercq, Ben Rajeb, Cools, 2017) dispensé à l'Université de Liège dans le cadre du Master d'ingénieur architecte. Ce cours enseigne les fondements de la recherche scientifique, décrit et détaille l'ensemble des composantes d'un travail scientifique. Ce cours a permis d'obtenir une vue claire sur le processus de réalisation d'un travail de fin d'études.

- Plusieurs articles scientifiques, travaux de fin d'études ou thèses viennent évidemment compléter les ressources permettant de créer la base de développement d'une méthodologie. Nous citerons à titre d'exemple : le TFE d'Anne Van De Vreken (2008) portant sur la perception et la représentation de l'espace architectural. Sa partie expérimentale fut une base intéressante à l'établissement de notre méthodologie, La thèse de Safin (2012), analysant les processus d'externalisation graphiques, a été très utile à notre instruction sur le sujet.

Plusieurs éléments intéressants lors du processus de mise en place de l'expérimentation peuvent être relevés :

- Le caractère itératif de la méthode : par la réalisation d'expériences tests permettant de vérifier l'application du protocole défini, par la réalisation de codage test par un autre observateur afin de valider la grille de codage. Nous discuterons de l'ensemble de ces points dans la suite du travail.
- L'établissement d'hypothèses de recherche permettant de donner une direction au travail. En effet, en fixant l'élément d'étude nous avons pu imaginer un nouveau scénario analysant ces éléments. Nous avons donc émis les hypothèses suivantes :
 - Nous cherchons à analyser uniquement l'apport de la RA dans le processus de revue de projet. Nous n'étudierons pas les interactions avec l'environnement en RA, ni la façon dont les concepteurs utilisent la plateforme. Cependant, nous rédigerons un paragraphe, en conclusion de ce travail, sur les limites rencontrées lors de la réalisation des expériences.
 - Nous éloignons le caractère collaboratif du processus de conception. Le but n'est pas d'analyser une phase de création ou de production, mais bien un moment ponctuel du processus correspondant à la revue de projet. Nous visons donc un moment assez court à l'échelle de la conception d'un avant-projet.

2.1. LE CHOIX DU TYPE DE RA

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, la variété des systèmes disponibles est très large. Notre but était donc de sélectionner le plus pertinent pour notre cas. La description suivante nous permet d'analyser les différentes possibilités au moyen de critères définis selon les besoins de notre expérience. Ceux-ci sont :

- L'accessibilité du système tant sur le plan financier qu'au niveau de sa disponibilité et de sa facilité d'utilisation. Le but de choisir un système « accessible » est pertinent : l'intégration de nouveaux outils numériques dans les bureaux d'architecture n'est pas automatique. Ainsi, selon l'étude menée par Stal, Jancart et Elsen (2018), la complexité d'utilisation de ces outils est encore aujourd'hui un facteur freinant l'intégration de ces systèmes. Choisir un système simple d'utilisation et financièrement accessible, c'est permettre de le proposer au plus grand nombre.
- L'interopérabilité software-hardware. L'utilisation de la réalité augmentée nécessite de faire une hypothèse majeure : les concepteurs ont, au stade de l'avant-projet, une maquette numérique 3D de leurs objets. Cette hypothèse n'est pas hasardeuse. En effet, l'augmentation de l'intégration du BIM dans les bureaux d'architecture offre la possibilité aux concepteurs de visualiser très tôt les projets en trois dimensions. Malgré la complexité d'utilisation et le prix relativement élevé des solutions sur le marché (David, 2018), la législation poussant vers l'utilisation de ces logiciels, l'adoption de ces solutions est croissante. L'enjeu est donc d'offrir une interopérabilité entre les logiciels de BIM d'une part et les appareils de RA d'autre part. Les masques ou casques de RA n'étant pas encore arrivés à une vraie maturité (Arnaldi, Guillon, 2018), rares sont les solutions ouvertes permettant aux éditeurs de développer une application permettant de les utiliser à cette fin.
- La disponibilité d'applications en lien avec la conception architecturale. Ce critère découle de l'analyse ci-dessus. Les fabricants de masques ou casques ont généralement créé leurs applications propriétaires ou ont certains partenariats avec des entreprises, à l'instar de Microsoft qui a récemment annoncé quelques collaborations avec Phillips pour la médecine ou encore Trimble pour la construction. Le secteur de la conception architecturale n'étant pas le secteur de développement premier, il existe aujourd'hui très peu d'applications permettant d'interagir avec ces modèles.

Suite aux réflexions, nous en sommes venu à la conclusion qu'un système généraliste tel qu'une tablette numérique a donc plusieurs atouts. La tablette numérique est aujourd'hui l'outil nomade par excellence. Sa puissance embarquée aujourd'hui similaire à un ordinateur portable et ses composants intégrés tels qu'une caméra, un gyroscope, un capteur de luminosité et de pression permettent d'imaginer toutes sortes d'applications.

Les kits de développement d'applications étant ouverts à tout le monde, chaque entreprise est libre de concevoir un logiciel répondant au mieux à ses besoins. Ce système a permis de voir émerger une variété de solutions innovantes pour certaines, gadgets pour d'autres, mais néanmoins originales. L'ensemble de ces paramètres nous a donc permis de valider le choix de la tablette numérique.

Plus précisément, nous avons choisi de travailler avec l'Ipad d'Apple (modèle Ipad Pro 10,5) pour une raison évidente : Apple s'intéresse fortement à la réalité augmentée, surtout pour l'élaboration du jeu en RA. Cet intérêt est bénéfique pour les développeurs d'applications. En effet, Apple a lancé depuis plusieurs années maintenant l'ARKit (Apple, 2019), un kit de développement spécialement conçu pour la RA, permettant aux développeurs d'utiliser au mieux l'ensemble des composants embarqués de l'appareil. On retrouve ainsi une grande variété d'applications disponibles sur leur plateforme. Ces applications feront l'objet de la discussion du point 2.6.

2.2. CHOIX DES PARTICIPANTS

Pour la réalisation de cette expérience, nous avons besoin de concepteurs formés à la revue de projets. Notre choix s'est arrêté sur les étudiants de 3^e bachelier et 2^e master ingénieur architecte de l'Université de Liège. Leur niveau de formation permet de considérer l'expertise des concepteurs comme suffisante pour analyser un projet de petite taille (celui-ci sera décrit dans la prochaine section). De plus, leur intérêt normalement développé pour l'architecture et pour l'expérimentation de nouvelles technologies dans le cadre de leurs études universitaires peut être supposé. En effet, selon Jancart Stal et Elsen (2018), on remarque que l'utilisation des technologies numériques dans les agences d'architecture de petite taille (moins de 10 personnes) est inversement proportionnelle à l'âge. Celle-ci diminuant avec l'augmentation de l'âge. Choisir un panel de concepteurs de moins de 25 ans pour 100% des participants est donc une piste permettant de faciliter la prise en main rapide de la technologie. En effet, ils sont généralement jugés comme plus à l'aise avec l'outil numérique.

Ainsi, quinze personnes composent finalement le panel de résultats. Sept d'entre eux suivent le cursus classique d'ingénieur architecte de l'ULiège et sont en 3^e bachelier. Ils ont donc suivi les cours de méthodologie du projet architectural de 1^{re}, 2^e année et 3 années d'ateliers axés sur la conception de logements unifamiliaux et de multilogements, des cours d'introduction aux dimensionnements tels que les cours de conception de structure métallique et béton et de conception de structure en bois. Ils sont également en finalisation de leur projet de modélisation numérique. Ce dernier consiste en la modélisation 3D d'un bâtiment de grande ampleur en vue d'acquérir des compétences dans la stratégie de modélisation, mais également de découvrir un ensemble de nouveaux logiciels de modélisation tels que Rhino, Grasshopper, Sketchup et des logiciels de rendus et traitement d'images tels qu'Artlantis ou Photoshop.

Les huit autres concepteurs sont étudiants en 2^e Master. Ils ont, en plus des cours précités, suivi les cours d'atelier IV consistants en la conception d'un avant-projet d'un bâtiment dédié aux spectacles ayant une superficie de plusieurs milliers de mètres carrés, des cours de conception et d'aménagement d'espaces publics et un cours de Studio Digital Collaboratif en partenariat avec L'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy visant en la création, par équipe de 4-5 étudiants provenant des deux écoles, d'un avant-projet. Le but était de travailler à distance et de pouvoir échanger au moyen de la plateforme Sketsha développée par le Lab for User Cognition & Innovative Design (LUCID) de l'Université de Liège permettant le partage en temps réel de documents et d'annotations graphiques. Parmi ces huit personnes, quatre ont suivi le cursus de bachelier classique, quatre proviennent de l'École des Mines d'Alès et ont intégré le master à la suite d'une passerelle d'une année reprenant l'ensemble des cours de méthodologie, d'atelier et de modélisation numérique. Nous pouvons donc considérer que tous les participants ont suivi la même formation de conception architecturale. En effet, il est important de noter que leurs acquis, leurs réflexes de concepteurs sont très certainement influencés par leurs formations et leurs expériences. Malgré le fait que cette expérience s'inscrive dans un contexte bien déterminé, l'impact qu'aurait ce contexte sur les résultats peut être considéré comme identique pour l'ensemble des participants. Enfin, les 15 concepteurs seront répartis aléatoirement dans 3 types d'expériences. Nous mentionnerons la répartition plus loin dans ce travail.

2.3. CHOIX DES SUPPORTS DE REPRESENTATION

Le cadre de l'expérience consiste à comparer différentes méthodes de représentation de projets architecturaux et d'analyser quantitativement et qualitativement la

compréhension à travers une mise en situation. Dans celle-ci, les concepteurs devront se glisser dans la peau d'un architecte devant effectuer une revue critique d'un projet pour un bureau partenaire. Les descriptions complètes des énoncés et du contexte imaginé sont disponibles aux annexes 7.1 à 7.3.

Les différents supports de représentation de ces mises en situation jouent plusieurs rôles dans notre perception de l'information décrite. Le but principal est, selon Kirsh (2010) in (Safin, 2011) « *un moyen qui permet d'améliorer l'efficacité et l'efficacité des activités cognitives.* » En effet, chaque personne utilise parfois un mode de représentation externe pour des tâches qui, à première vue, n'en nécessiteraient pas. Ainsi une note sur une liste de tâches que l'on pourrait facilement retenir pourrait être écrite afin d'y ajouter un ordre d'importance ou de priorité de réalisation qui peut être difficile à visualiser mentalement. Dans sa thèse, Safin (2012) décrit les différents rôles que joue un support de représentation, notamment il permet :

- **D'alléger la charge mentale.** Considéré comme la plus évidente cet allègement permet, entre autres, de ne pas maintenir de l'information dans la mémoire de travail et d'alléger la charge mnésique. De plus, ces informations ne risquent pas d'être altérées par le temps.
- **Structurer le comportement.** En effet, la manière dont est représentée une information peut influencer notre comportement. Le concept « d'affordance » est largement utilisé dans le monde du design et de l'ergonomie. Par exemple, la forme d'un interrupteur vous invitera plutôt à pousser, tourner ou encore lever pour allumer ou éteindre la lumière.
- **Matérialiser l'information.** Une fois une idée matérialisée sur un support, celle-ci devient un élément physique permettant d'être mesuré, touché, manipulé ou partagé. De plus, cette matérialisation fige l'idée provenant de la pensée. Elle permet donc après d'être modifiée ou améliorée.
- **Étendre la cognition.** Externaliser une information sur un support permet, de manière générale, d'étendre les capacités réflexives. Un bon exemple est l'utilisation de maquettes de travail permettant l'étude volumétrique d'un bâtiment. La matérialisation d'un volume pensé permet de le travailler et de complexifier la réflexion sur celui-ci.

Dans le cadre de notre expérience, nous avons sélectionné deux types de support parmi les 7 catégories définies sur bases des travaux de Safin (2012), Elsen (2011) et Baudoux, Calixte et Leclercq (2019). Celles-ci sont :

- **Les plans et coupes 2D.** Considéré comme le support de base en conception architecturale, il est encore aujourd'hui l'élément le plus utilisé comme outils de réflexion et de communication du projet d'architecture. Il nous semblait donc être la base de travail idéal à notre objectif de comparaison.
- **L'immersion 3D.** Ce support permettra d'utiliser une application de RA et ainsi, la comparaison à notre support de base. Le concepteur aura donc à sa disposition un modèle 3D virtuel projeté dans un environnement réel dans lequel il pourra évoluer et interagir.

Ces deux supports seront intégrés dans 3 types de revues de projet. Nous réaliserons ainsi trois expériences différentes :

- Une analyse au moyen de support de plan et coupe 2D.
- Une analyse au moyen d'une maquette 3D en réalité augmentée.
- Une analyse au moyen de la combinaison des deux méthodes citées ci-dessus.

La comparaison des deux méthodes nous permettra, dans un premier temps, d'analyser la façon dont les concepteurs s'y prennent pour parcourir une revue de projet et dans un second temps d'établir une base de données nous permettant d'établir des statistiques sur des critères définis. Ensuite, la troisième expérience nous permettra de voir comment se passe l'analyse : quel choix privilégie le concepteur et quels résultats ce même concepteur obtient en fonction de la répartition des outils utilisés.

2.4. COMPOSITION DE L'AVANT-PROJET ET TYPOLOGIES D'ERREURS

L'avant-projet représenté est tout à fait fictif. En effet, il n'est aucunement nécessaire de se baser sur un bâtiment existant. Ce choix aurait pu inclure un biais dans l'expérience car un concepteur aurait pu connaître le projet. La mémoire et les connaissances préalables de l'organisation ou de la volumétrie auraient alors pu influencer les résultats. Nous avons donc décidé de créer un avant-projet complètement fictif. Afin d'obtenir une démarche en corrélation du choix des participants, nous avons décidé de concevoir un habitat unifamilial. En effet, les concepteurs étaient formés et familiarisés à l'analyse et à la conception de cette échelle de bâtiment. Le programme de l'habitation est assez standard, la recherche d'originalité architecturale n'étant pas le but de ce travail. L'ensemble du programme détaillé est disponible aux annexes 7.1 à 7.3. Nous reprenons ici sommairement la composition de ses espaces :

- Un hall d'entrée
- Un garage

- Un wc séparé
- Un bureau pouvant accueillir une profession libérale
- Un espace de vie
- Deux chambres
- Une salle de bain
- Un local technique
- Une terrasse avec piscine

Comme nous l'avons expliqué plus haut dans cet ouvrage, notre analyse se basera sur la détection d'erreurs au moyen de deux supports différents.

Reason (1993) définit trois principaux types d'erreurs :

- **La faute.** Décrite comme une erreur de règle ou de connaissance elle survient suite à une mauvaise application d'une norme ou à cause d'un manque de connaissance. Exemple : je pense connaître une règle de bonne pratique, je l'applique, cependant celle-ci est erronée.
- **Le lapsus.** Décrit comme un problème de mémorisation de l'information. Exemple : je mémorise un élément, mais j'effectue une tâche différente.
- **Le raté.** Décrit comme un problème lors de l'exécution d'une tâche. Exemple : J'ai une tâche correcte en mémoire, cependant je l'exécute mal.

Les éléments nous intéressant pour ce travail sont les mécanismes de détection d'erreurs. Sellen (1994) et Safin (2012) en définissent 3 :

- **La détection basée sur l'action.**
- **La détection basée sur les résultats des actions**
- **La détection basée sur la limitation des fonctions**

La littérature regorge d'études sur la notion d'erreur en sciences cognitives, mais est moins fournie en conception architecturale. Cependant, quelques auteurs s'y sont intéressés, notamment Leclercq (1994), Safin (2012), et Safin, Leclercq et Blavier (2008), dans leur étude empirique des mécanismes d'erreurs, ils donnent leur définition d'une erreur : « *Toute déclaration et/ou action et/ou décision menant à un résultat incompatible avec les données du problème ou avec le développement d'une solution efficace d'un point de vue fonctionnel, technique ou culturel* ».

Outre ces notions importantes sur la définition et la notion d'erreur en architecture. Les études émettent des conclusions et décrivent des concepts importants pour notre expérimentation :

- « *L'erreur fait partie intégrante du processus de conception* ». En effet, les démarches d'essais-erreurs appliquées lors d'une phase créative font ne peuvent pas être dissociées du processus.
- « *70% des erreurs détectées le sont par des observateurs externes.* ». Cette constatation confirme que notre choix de faire intervenir des concepteurs externes au projet est pertinent.

2.5. CHOIX DU LOGICIEL DE MODELISATION DE L'AVANT-PROJET

La partie conception du projet n'étant pas analysée dans ce travail, nous avons choisi le logiciel sur base, principalement, de nos besoins et des possibilités d'interactions avec les applications de réalité augmentée.

Les livrables à produire pour la réalisation des expériences sont :

- Plans 2D
- Coupes 2D
- Volumétrie 3D

Le choix du logiciel s'est naturellement porté sur un logiciel BIM et ce pour plusieurs raisons :

- La possibilité de produire les plans 2D, d'en générer des coupes parlantes et de profiter du modèle 3D généré automatiquement est, d'une part, un gain de temps et d'autre part un moyen de s'assurer qu'un élément 2D représenté à l'aide d'un outil BIM se retrouve visible dans la vue 3D (et vice-versa, cela en considérant un travail avec des objets 3D). Cela diminue également le risque d'inégalité de représentation de l'information entre les livrables 2D et 3D.
- Les éventuelles modifications à apporter durant la phase de conception sont automatiquement mises à jour dans l'ensemble des types des documents générés.

Nous avons finalement décidé de travailler sur la plateforme ArchiCAD pour d'une part les connaissances que nous avons développées durant le cursus sur ce logiciel, et d'autre part pour la variété d'exportation possible de la maquette numérique. En effet, de nombreux types de formats d'export ayant des caractéristiques très différentes existent. On retrouve parmi les plus connus : les formats IFC, Sketchup, 3DS, DWG 3D, Rhino 3D, Collada, VRML (format spécialisé pour la réalité virtuelle), U3D (format standard de modèle 3D). Tous ces formats nous laissaient donc la possibilité de tester plusieurs types d'export et maximisaient la compatibilité en fonction de l'application choisie.

2.6. CHOIX DE L'APPLICATION MOBILE

Le choix de l'application a été effectué en 3 phases :

- **La première : exploratoire.** La première étape consistait à répertorier les solutions disponibles sur le marché. En effet, le catalogue d'applications étant assez fourni, il était important de procéder par élimination en testant et rejetant les logiciels considérés comme des « gadgets » non aboutis ou encore de solutions s'éloignant trop de notre thématique, telles les applications orientées jeux vidéo. Avec cette première sélection, nous avons élu trois applications :
 - Augment. Fondée par le français Jean-François Chianetta⁶, cette application mobile avait pour but d'améliorer l'expérience d'achat sur internet en proposant un nouveau moyen de visualisation des objets. Aujourd'hui, ces fonctionnalités toujours très orientées sur le commerce en ligne ont intégré une branche permettant la promotion immobilière. Ce développement a créé des fonctions liées aux bâtiments et donc à l'architecture.
 - AR Studio. Cette application gratuite normalement couplée avec un masque de réalité mixte low cost fait partie d'une suite développée par la société Aryzon. Utilisable sans masque, elle permet l'intégration de modèles 3D génériques.
 - AR Viewer. Basée également sur la visualisation d'objets, à des fins commerciales, elle permet soit d'afficher des objets de leur bibliothèque ou d'importer un modèle personnel.
- **Une deuxième : établissement de critères.** Nous avons défini ensuite des critères permettant de fixer les fonctionnalités nécessaires au bon déroulement de l'expérience. En effet, nous avons pour cela imaginé plusieurs scénarios d'usages nous permettant de relever les fonctionnalités incontournables. L'application devait donc pouvoir absolument :
 - Avoir un format d'importation compatible avec notre logiciel de modélisation.
 - Un système de calibration nous permettant de bloquer le modèle 3D dans l'espace.

⁶ Logiciel Augment, consulté le 2 août 2019 sur Augment : <https://www.augment.com/about-us/>

- Permettre le mouvement selon le plus d'axes possibles ainsi que le redimensionnement.
- Un prix accessible ou une disponibilité open source nous permettant d'en modifier les fonctionnalités si besoins.

En plus de ces fonctions basiques, nous avons imaginé d'autres possibilités telles que :

- La possibilité de générer des coupes en temps réel.
- La possibilité d'afficher de l'information textuelle.
- La possibilité d'interagir avec le modèle en pouvant sélectionner des éléments.
- La possibilité d'afficher un ombrage ou des variantes d'éléments.
- **Une troisième phase de test.** Après avoir dressé le tableau comparatif et effectué notre choix, nous avons testé l'application avec des modèles 3D de bâtiments de différentes tailles, de formats de fichiers et de niveaux de détails.

Le choix de l'application permettant de générer le modèle en réalité augmentée s'est porté sur le logiciel Augment. L'application fonctionne sur le principe du tracking d'un élément préalablement enregistré. Un tracker 2D sous forme d'une page à imprimer est généralement fourni par le développeur de l'application (figure 14). L'application permettait la création de tracker personnalisé. Nous avons donc envisagé la solution d'utiliser notre propre plan 2D comme outils de calibration. Ce système aurait pu permettre d'obtenir un effet d'extrusion du plan dans la 3^e dimension. Cependant nos essais ont montré un réel manque de stabilité. Nous avons donc abandonné cette possibilité.

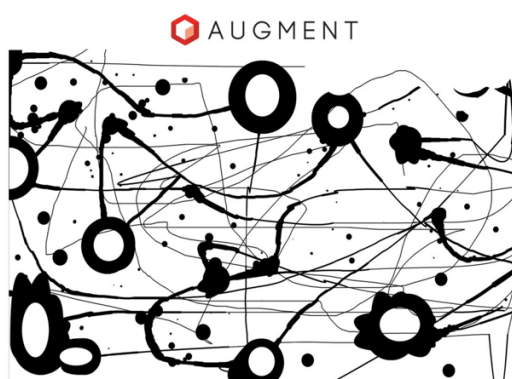


Figure 14 : Exemple du tracker universel fourni avec l'application (Augment, 2019)

Critères	Augment	AR Studio	AR Viewer
Prix	Version gratuite pour étudiants.	Gratuit	Gratuit
Format d'importation	.DAE .OBJ	Banque de données Sketchfab. Le modèle doit d'abord être importé sur une banque de données en ligne avant d'être utilisable. Format .STL .SKP	.OBJ .STL .USDZ
Système de calibration	Tracker 2D standard ou image personnalisée.	Tracker standard à utiliser ou détection automatique des surfaces.	Trackers standards ou détection automatique des surfaces.
Possibilités d'interactions	Translation et rotation selon les 3 axes, mise à l'échelle, verrouillage de la position. Capture d'écran de l'interface.	Positionnement selon 2 axes, rotation autour d'un seul axe. Redimensionnement sans échelle graphique. Capture d'image.	Translation selon 2 axes, rotation selon 3 axes, redimensionnement.
Fonctions connexes	Afficher ou masquer les ombrages. Switch rapide entre deux modèles.	Possibilité de faire bouger l'objet.	Aucune fonction supplémentaire.

Figure 15 : Tableau des solutions logicielles comparées.

Ce tracker, une fois posé dans un environnement réel, est utilisé pour positionner un modèle préalablement chargé dans l'application. Ce modèle est donc dépendant de la position du tracker. Contrairement aux solutions de détection automatique de surface permettant l'ancrage d'un objet virtuel 3D dans l'espace, cette solution apporte une meilleure stabilité grâce à la forme du tracker personnalisé et adapté à l'application. Cependant, il est nécessaire d'en avoir une copie physique en permanence pour pouvoir utiliser l'application.

L'application est composée d'une version mobile sur tablette et smartphone et d'une interface de gestion des modèles sur ordinateur. Cette plateforme permettait donc une meilleure gestion des itérations produites avant la version finale. La fenêtre principale est

composée de 3 zones : la zone de visualisation, la zone de réglages et la fonction capture d'écran (Figure 16).



Figure 16 : Ecran principale de visualisation (Photo de l'auteur).

Donc, celle-ci combine différentes caractéristiques intéressantes pour l'expérience notamment : le positionnement d'un objet selon 3 axes, l'ajout de textures et l'ajout d'ombrage. En outre, la stabilité du modèle dans l'espace est à souligner. L'application tournera sur un iPad pro 10,5" (modèle 2017).

2.7. PRESENTATION DU PROJET

Maintenant que l'ensemble des supports de modélisation et de représentation sont connus, nous allons passer à la phase de production des documents finaux. Comme expliqué plus haut, l'aspect processus de conception n'étant pas étudié ici, nous n'allons pas détailler l'ensemble du cheminement pour aboutir aux livrables. Nous rappelons également que l'avant-projet est totalement fictif et n'est basé sur aucun bâtiment connu.

L'habitation est implantée sur un terrain en pente mesurant 30 m de long par 20 m de large. Ces dimensions permettent de représenter l'avant-projet à une échelle de 1/50^e et occupant 60 par 40 cm d'espace. Ainsi, aussi bien les plans que la maquette 3D numérique ont une taille raisonnable et un niveau de détails suffisamment élevé. En effet, après quelques tests, l'échelle 1/100 était clairement trop petite pour la taille du projet et une échelle plus grande n'avait ici aucun sens vu le stade d'avancement présumé. Le projet se développe sur 1 niveau et demi, il présente un dégagement à front de voirie

permettant d'y intégrer un cheminement jusqu'à la façade d'entrée et une zone de parking extérieure en plus du garage. L'orientation presque nord-sud du projet offre une belle ouverture de l'espace de vie vers le jardin. Enfin, le projet intègre la pente du terrain en utilisant un demi-niveau pour l'espace de nuit (figures 17, 18 et 19).

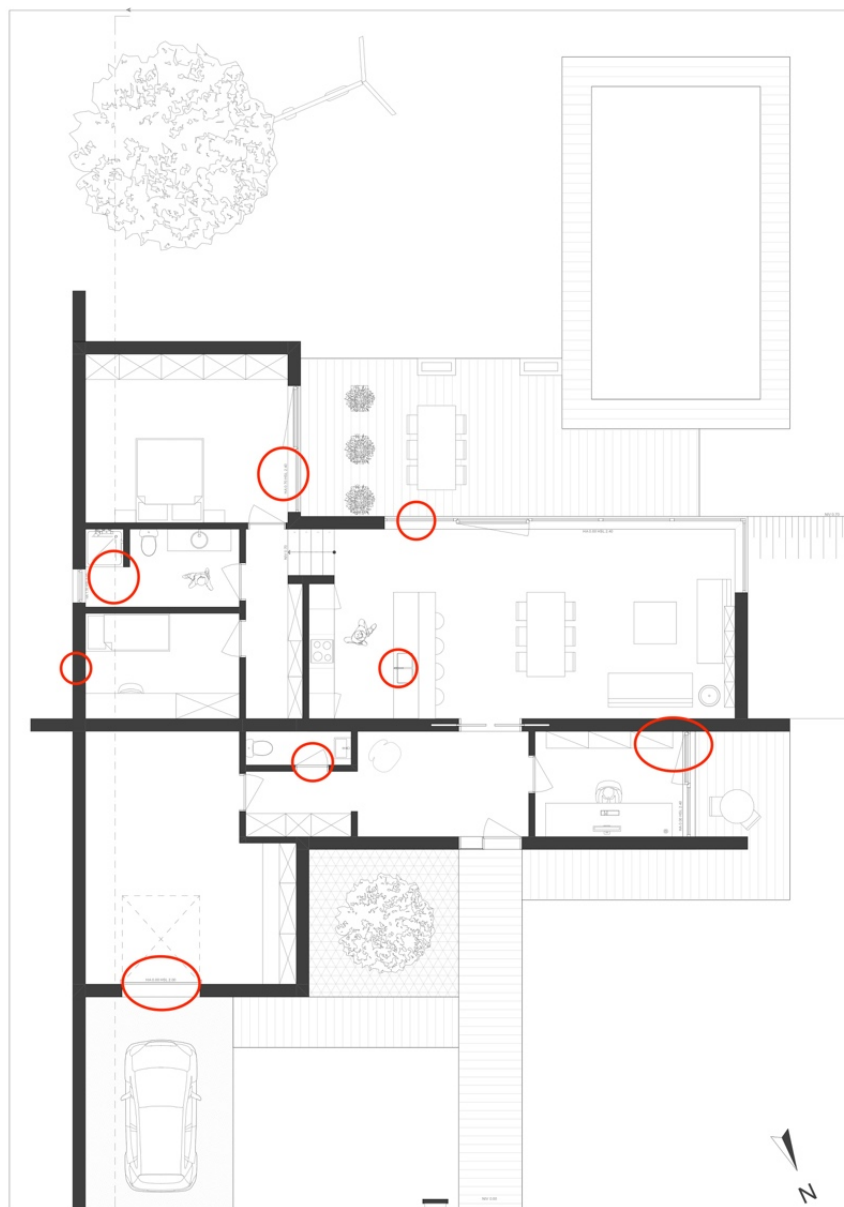


Figure 17 : Plan du projet localisant (en rouge) les erreurs à détecter.

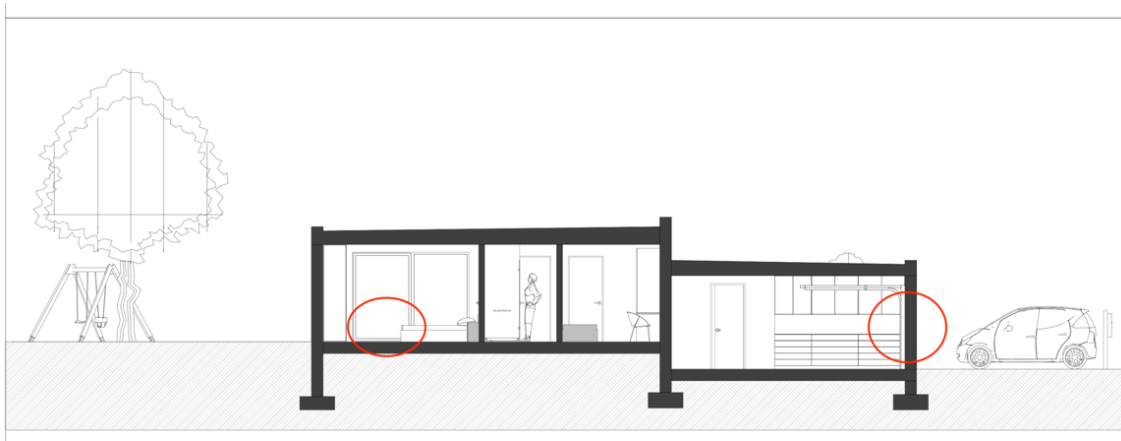


Figure 18 : Coupe longitudinale du projet.

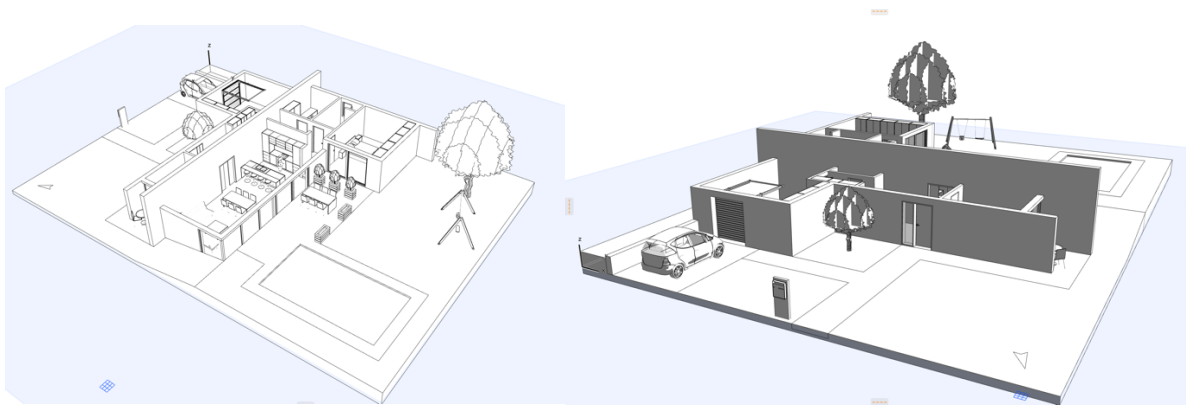


Figure 19 : Quelques vues 3D du projet.

Le bâtiment intègre un ensemble de 10 erreurs volontairement glissées durant la conception. Ce nombre ne sera pas connu des concepteurs et l'appréciation subjective de la notion d'erreur de chaque participant fait que ce nombre peut être considéré comme variable. Nous ne nous permettrons donc pas de donner une analyse du pourcentage détecté, car cette valeur pourrait ne pas avoir une consistance scientifique suffisante. De plus, nous le verrons dans la partie résultats de ce travail, certains ont émis des commentaires considérés comme étant une « erreur de conception » mais n'étant, pour nous, pas répertorié comme telle. Enfin, nous n'étions pas non plus à l'abri d'en commettre involontairement. Cependant, ce nombre a l'avantage de constituer une bonne base de travail. Ces erreurs sont :

- Le programme décrit un local technique n'apparaissant pas dans le projet.
- Le plan, la coupe et la maquette 3D sont représentés à l'échelle 1/50^e. Cependant, aucune échelle n'est dessinée sur les documents.
- La différence de niveaux entre l'avant et l'arrière n'est pas intégrée dans le projet : aucun accès depuis l'espace de vie vers la terrasse n'est possible.

- La porte des toilettes du hall d'accueil ne s'ouvre pas dans le bon sens et ne permet donc pas une bonne utilisation du local.
- Une des chambres n'a pas de fenêtre.
- La hauteur d'allège décrite sur le plan de la chambre connectée à la terrasse n'est pas correcte.
- L'évier de la cuisine est installé dans le mauvais sens.
- L'aménagement du bureau ne permet pas d'ouvrir suffisamment la fenêtre pour accéder à l'extérieur.
- La porte de garage est trop peu large pour qu'une voiture puisse y entrer.
- La porte de la douche s'ouvre dans le mauvais sens.

Les documents finaux (repris aux annexes 7.4 à 7.6) présentés aux concepteurs sont :

- Pour l'expérience 2D : un plan au 1/50^e et 1 coupe au 1/50.
- Pour la RA : la maquette 3D numérique.
- Pour l'expérience mixte : l'ensemble précité ci-dessus.

La durée par passage étant évaluée à 15 minutes il nous semblait nécessaire de ne pas proposer trop d'informations. Les limiter à un plan et une coupe représentative permettait de ne pas perdre trop de temps au tri des documents. De plus, ils étaient suffisants pour comprendre le projet, vu sa taille, sa simplicité et son développement sur un seul niveau.

2.8. MISE EN PLACE DES EXPERIENCES ET PROTOCOLE

Nous allons maintenant aborder la mise en place des expériences et l'ensemble des préparatifs nécessaires à la bonne réalisation de celles-ci.

Les expériences se sont déroulées dans le Studio 1 du LUCID sur le site du Sart-Tilman de l'ULiège. Les 15 passages ont été découpés en 2 journées une première fin avril 2018 et la seconde début mai 2018. Ce découpage avait l'avantage de pouvoir programmer les passages en fonction des plannings de chacun. Afin de respecter le bon déroulement, il était demandé à chaque personne de ne pas échanger avec les autres concepteurs-participants ni entre les passages ni entre les deux journées, cette demande fut, nous pensons, bien respectée par l'ensemble des participants.

2.8.1. L'ESPACE EXPERIMENTAL NECESSAIRE

L'espace mis à disposition nous permettait de réaliser les 3 types d'expériences au même endroit. Deux types de postes devaient être préparés :

- Le poste 2D :

Il était composé d'un bureau de dimensions standards sur lequel étaient préparés le plan, la coupe et des éléments permettant l'annotation, la mesure et le dessin à savoir : un ensemble de quatre feutres d'épaisseur différente et une équerre Aristo (figure 20).

Un ordinateur faisant office de timer permettait au participant, d'une part, de voir où il en était et d'autre part à l'observateur de pouvoir avoir des points de repère temporel dans ses notes.

Enfin, l'expérience était filmée et la caméra était positionnée de façon à visualiser l'ensemble des éléments précités.

- Le poste RA :

Le poste RA est composé de deux éléments : Un pupitre réglable en hauteur d'une surface de 60cm sur 50 cm (correspondant à la taille de la maquette numérique) sur lequel le tracker est collé et une aire de circulation minimale permettant le libre mouvement autour du modèle (Zone verte sur la figure 21). Le timer et la caméra servent autant pour l'expérience 2D que pour la 3D.



Figure 20 : A gauche, le poste 2D, à droite, le poste RA (Photos de l'auteur).

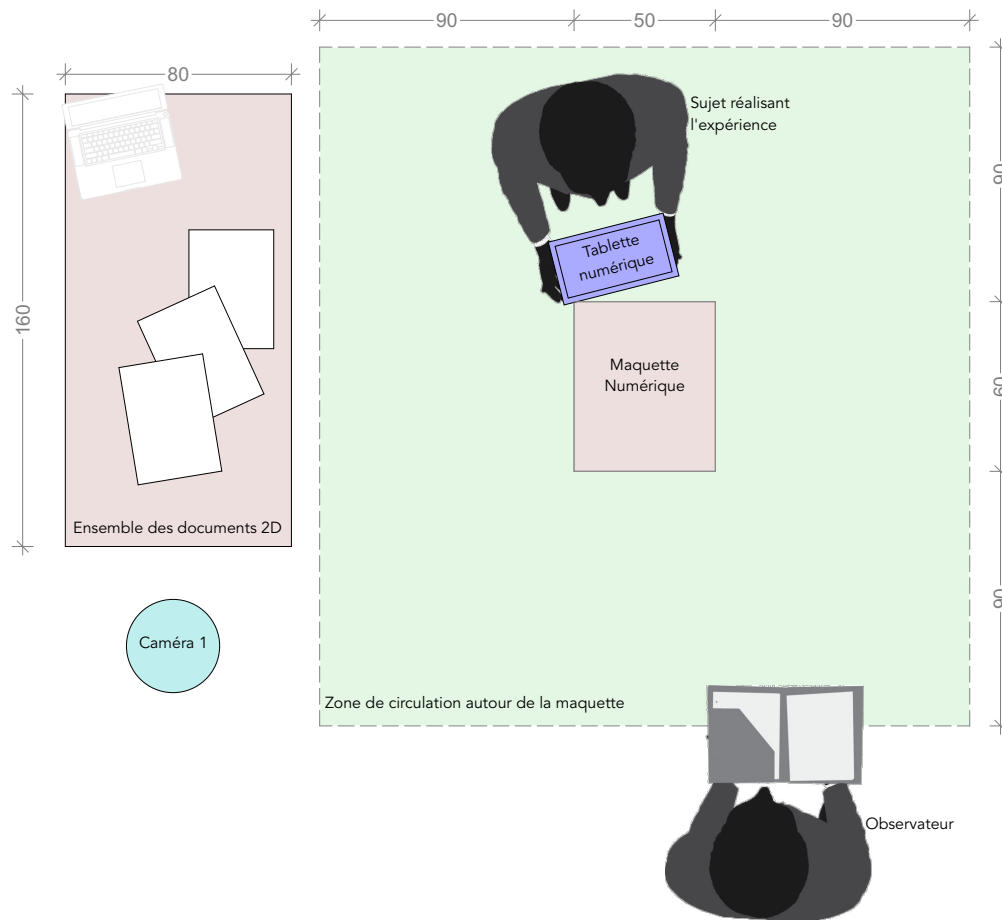


Figure 21 :Plan schématique de l'espace expérimental.

2.8.2. L'ANALYSE PAR L'OBSERVATION ET L'INTERVIEW INFORMELLE

Nous avons choisi l'observation comme moyen de collection des données. En effet, les expériences étant principalement basées sur des actions réalisées par les participants telles que l'annotation sur plans, le mouvement dans l'espace, le commentaire verbal, la capture d'écran sur tablette, ce moyen semble être le plus adapté pour analyser a posteriori les données. Une interview informelle de quelques minutes était néanmoins réalisée dans le but de recueillir les ressentis à chaud des participants sur les actions qu'ils venaient de réaliser.

Selon Blondin (2005), l'observation se découpe en 3 phases :

- **La préparation**

Cette phase a pour but de planifier l'observation en déterminant la nature, l'objet, le nombre d'observations à effectuer, la logistique et le rôle de l'observateur.

- **La réalisation**

Cette phase correspond à l'observation des expérimentations. La durée de chaque expérience étant déterminée par le participant, le temps total d'observation n'est pas connu avant la réalisation de celles-ci. La bonne exécution de l'observation dépendra également des outils et des éléments que l'observateur sera capable de capter. Pour nous aider, nous avons décidé d'enregistrer les passages. Une caméra enregistre le point de vue de l'observateur (image et son) en filmant l'espace d'analyse (2D ou 3D) et la tablette enregistre le point de vue du participant en enregistrant son propre écran (image et son), ainsi nous pouvons visualiser l'ensemble des actions des participants. Afin de respecter la confidentialité de chacun, un accord d'utilisation de production et de droit à l'image était distribué et complété par chaque participant. Ce document est disponible à l'annexe 7.9. Leur participation étant sur base volontaire, aucun participant n'a refusé d'être enregistré.

En complément des images vidéo, une grille de prise de notes était complétée en temps réel par l'observateur. Cette grille (figure 22), basée sur le cours d'Analyse des Processus de Conception, permet d'annoter des événements ponctuels ayant lieu au cours de l'expérience, mais également de cocher des critères prédéfinis (décrits plus loin dans ce travail). Ce système permet d'être plus rapide et de consacrer plus de temps à l'observation visuelle du participant. De plus, le participant étant enregistré, cette grille peut être complétée a posteriori. La grille d'analyse est reprise à l'annexe 7.5.

- **Le traitement des données**

Ce point concerne l'étape de retranscription des données observées et de l'analyse de celles-ci en fonction de critères pertinents en lien avec notre étude. Nous aborderons cette phase dans le chapitre suivant.

EXPERIENCE REVUE DE PROJET - GRILLE D'ANALYSE							
N° Sujet	Date	h début			h fin		
Sexe :	14/05	14h41			14h54		
Age :							
	2D	RA	RA + 2D				
Type de revue		X					

Temps	Description de l'interaction	Focus (Hall, Place de vie, hall de nuit, chambre, garage, extérieur)	Action (Mesure, dessin, réfléchit, se balade dans le modèle, capture)	Détection d'erreur (oui ou non)	Type d'erreur détectée (structurelle, aménagement, topographie, ...)	Niveau d'abstraction (ensemble, intérieur, pièce, microarchitecture, détail)	Commentaires
00:00	let go						
00:30	entre direct dans les pièces						
01:00	main qui dépose dans le frigo			X			
01:30							
02:00	difficulté de voir les prix en compte			X			
02:30							
03:00	regarder dans la chambre			X			
03:30	mettre du papier						

Figure 22 : Exemple de la grille d'analyse utilisée.

2.8.3. DEROULEMENT TYPE D'UN PASSAGE

Chaque expérience nécessite 30 minutes pour être réalisée. Notons que cette demi-heure comprend le temps nécessaire de préparation avant la réalisation et de rangement après celle-ci.

PHASE DE PREPARATION (MINUTE 0 A 5)

La phase de préparation peut se découper en plusieurs points :

- Installation du pupitre et du tracker.
- Préparation des documents 2D faces cachées, de l'énoncé et des outils d'annotations.
- Connexion de l'ipad et synchronisation du modèle 3D avec le tracker.
- Installation du timer.
- Préparation de la caméra et vérification du cadrage.

PHASE DE LECTURE DE L'ENONCE (MINUTE 5 A 10)

Le sujet entre et s'installe à son poste en fonction de son type d'expérience. Il reçoit l'énoncé et prend environ 2 minutes pour le lire. Il peut ensuite poser des questions sur la tâche.

Pour l'accoutumance de la tablette, l'étudiant suit une prise en main de l'appareil et de l'application. L'observateur lui montre comment évoluer dans le modèle et comment utiliser les fonctions nécessaires au bon déroulement de l'expérience.

L'ensemble des deux tâches prend environ 5 minutes. Ces étapes ne sont pas chronométrées, car la phase de compréhension de l'énoncé n'est pas la cible de ce travail ; l'étudiant est donc libre de prendre le temps qu'il souhaite pour bien comprendre sa tâche.

PHASE DE REALISATION DE LA REVUE (MINUTE 10 A 25)

Pour l'expérience 2D, l'étudiant est déjà assis à son poste d'expérience.

Les documents se trouvent devant lui faces cachées.

La caméra est activée.

Le départ est donné lorsque le timer est mis en route. L'étudiant peut retourner les plans et commencer son analyse.

Lors de l'analyse, il ne peut plus poser de questions à l'observateur. Celui-ci doit agir comme s'il n'était pas dans la pièce. L'observateur étant dans le rôle d'un observateur complet au sens de Baker (2006). Il doit donc éviter toute interaction avec les participants.

À la fin des 15 minutes, l'observateur rassemble l'ensemble des documents : grille d'analyse, plans, dessins, annotations et commentaires écrits.

Pour l'expérience 3D, l'étudiant est assis à la table de lecture de l'énoncé, une fois ses questions posées, il est invité à suivre la prise en main de l'application.

Une fois que les fonctions sont assimilées par l'étudiant, l'observateur déclenche la caméra, et l'enregistrement de la tablette. L'analyse commence alors lorsque le timer démarre.

Pour l'expérience mixte, le participant a à sa disposition les deux plateformes, lorsque le timer est lancé il peut choisir d'utiliser l'une ou l'autre et peut changer autant de fois qu'il le souhaite pendant toute la durée de l'expérience.

PHASE POST EXPERIENCE ET INTERVIEW INFORMELLE (MINUTES 25 A 30)

À la fin de l'analyse, toutes les caméras sont arrêtées, les documents sont regroupés (grille d'analyse et diverses annotations des plans). Chaque document est numéroté pour qu'il corresponde à la grille d'analyse qui contient l'ensemble des informations du

participant. Quelques mots sont ensuite échangés avec le participant pour obtenir son ressenti à chaud, ces données annotées viennent compléter la grille d'analyse.

2.9. REALISATION D'UNE EXPERIENCE TEST

Avant de réaliser les 15 expériences qui constituent notre corpus d'analyse, nous avons réalisé une expérience de chaque type afin de tester le protocole. Nous avons ainsi pu nous rendre compte du temps nécessaire par sujet, la compréhension de l'énoncé, les bugs de logiciel, l'espace nécessaire au bon déroulement du projet, la grille de prise de notes, les plans de cadrage vidéo.

Suite à ces premiers tests, nous avons pu faire les adaptations suivantes :

- Modifier le point de vue de la camera pour obtenir un champ de vision plus large.
- Grossir la taille d'impression des traits des plans 2D.
- Améliorer la grille de prise de notes en la simplifiant à un déroulé temporel. En effet, nous avons remarqué que la grille était trop contraignante et nous perdions ainsi trop souvent le contact visuel avec l'action. Nous l'avons donc décomplexifiée et, ensuite, limitée aux annotations de mots clés.

3. TRAITEMENT DES DONNEES

Après avoir présenté la méthodologie de réalisation ainsi que les objectifs de ce travail, nous allons maintenant expliquer la méthode de traitement des données appliquée ainsi que le potentiel y découlant.

3.1. DONNEES DISPONIBLES

15 expériences ont été réalisées, la durée d'une expérience étant variable, la longueur d'un passage oscille entre 6'30'' à 15'00''. L'ensemble du corpus constitue ainsi 161 minutes de vidéos à traiter. Ces données sont complétées par les prises de notes (15 grilles), les plans et coupes (10 plans et coupes) annotés et les captures d'écran réalisées avec l'application (95 captures au total) ainsi que les interviews informelles (synthétisées en 15*5 mots clés).

Pour exploiter au mieux l'ensemble de ces données, nous avons réalisé un montage vidéo afin d'intégrer les deux points de vue enregistrés : le point de vue de l'observateur et celui du participant. Nous avons également ajouté un timecode permettant d'avoir une horloge plus visible que le timer à l'image ; ainsi l'encodage était facilité.

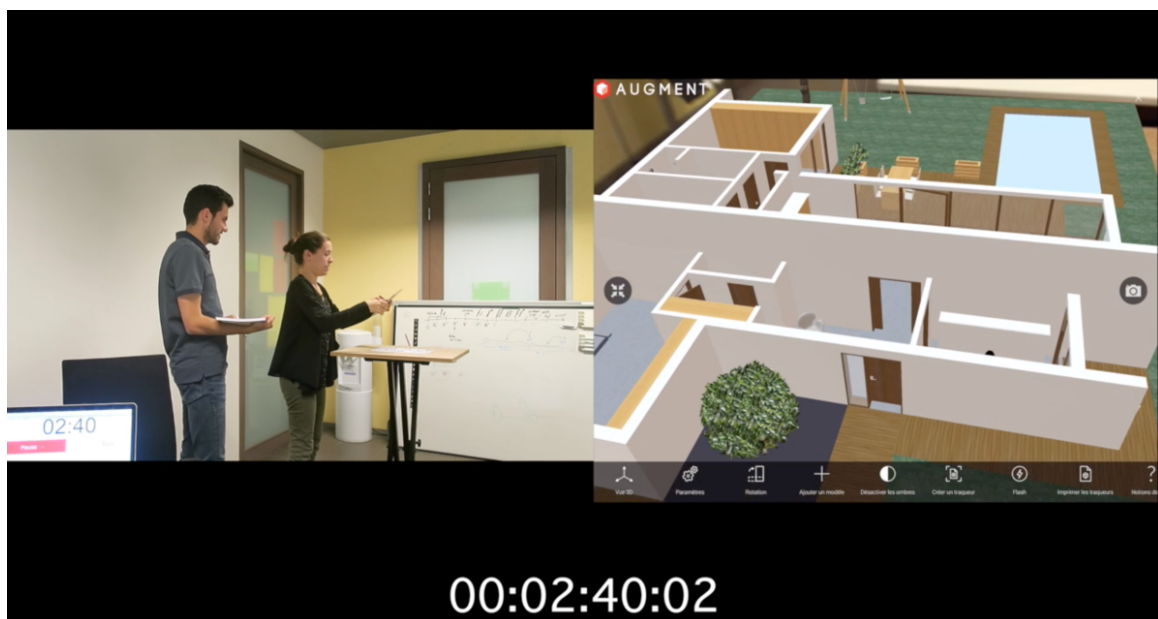


Figure 23 : Exemple d'un passage – A gauche le point de vue de l'observateur. A droite le point de vue du participant. En bas, le timecode.

3.2. METHODOLOGIE DE RETRANSCRIPTION

3.2.1. DEFINITION DE LA GRILLE DE CODAGE

Cherchant à comparer différents outils, à analyser les interactions entre eux et plus généralement à étudier un processus d'actions, nous avons décidé de partir des travaux de Leclercq et Ben Rajeb. Dans ceux-ci, ils s'intéressent au processus de conception collaborative. Celui-ci est notamment abordé au cours du séminaire d'analyse des processus de conception, durant lequel nous avons eu l'occasion d'utiliser une des grilles de codage. Les objectifs étant très différents, nous en reprendrons uniquement le principe, c'est-à-dire réaliser un encodage temporel dans lequel nous définissons un ensemble de critères discrets. Chaque unité temporelle est ainsi décrite selon une série de paramètres. Il s'agit d'une part d'un encodage descriptif où une description de l'action en cours sur l'unité temporelle est encodée, et d'autre part, d'un encodage discret ou oui/non où chaque paramètre est activé ou pas en fonction de l'observation. Ce principe est visible sur la figure ci-dessous.

Identifiants			Description	Critères																																						
Sujet	Type	Temps (mm:ss)		Niveaux d'abstraction								Focalisation						Actions																								
				Ensemble I	Bâtiment II	Intérieur III	Extérieur III	Place IV	Détail V	Je ne sais pas	Autre	Implantation	Programme	Structure	Fonctionnel	Aménagement	Lumière	Esthétique	Je ne sais pas	Autre	Annote	Dessine	Mesure	Explore la 3D	Capture	Commentaire	Reflexion personnelle	Autre														
				Description de l'interaction																																						
x	v	v																																								
1	2D	00:00	Démame tout de suite ses remarques par l'orientation du bâtiment, prend un feutre, annote le plan.																																							
2	RA	00:00	Fait le tour de la maquette, remarque le terrain en pente, signale qu'il manque une toit.																																							
3	RA+2D	00:00	"On dirait les Sims", ne sait pas trop par où commencer, décide d'utiliser la tablette.																																							
4	2D	00:00	Prend un feutre, regarde le plan dans son ensemble , (phase de compréhension générale).																																							
5	RA	00:00	S'acclimate à la tablette, tourne autour du modèle.																																							
6	RA+2D	00:00	S'acclimate à la tablette, teste l'option "capture".																																							
7	2D	00:00	Oriente le plan en mettant le nord en haut, prend un feutre, prend l'équerre en main.																																							
8	RA	00:00	Tourne autour du modèle, entre dans le bâtiment, période de test.																																							
9	RA+2D	00:00	S'acclimate à la tablette, tourne autour du modèle.																																							
10	2D	00:00	Regarde les plans, cherche l'orientation correcte du plan par rapport à la coupe.																																							
11	RA	00:00	Tourne autour du modèle. Passe de la vue en plan à élévation.																																							

Figure 24 : Exemple d'une partie de l'encodage réalisé.

Les paramètres que nous avons retenus sont ceux détaillés précédemment, nous allons les préciser dans la suite de ce travail. Ce descriptif constitue un moyen de reproduire l'expérience en se basant sur la définition de chaque terme. Ces paramètres sont :

- Détection et typologies des erreurs.
- Actions réalisées.
- Niveau d'abstraction.
- Utilisation des outils.
- Focalisation du concepteur.

TYPOLOGIES DES ERREURS

Dans le point théorique « Composition de l'avant-projet et typologies d'erreurs », nous avons vu que Reason définissait trois types principaux d'erreurs : la faute, le lapsus et le raté. Dans notre cas, nous ne pouvons utiliser cette classification. En effet, pour classer correctement les erreurs selon Reason, il est important de pouvoir observer le processus de conception et de voir d'où celles-ci proviennent. Cependant, dans notre cas, ces éléments étant ajoutés volontairement, elles constituent un état à un moment donné du processus. Nous ne pouvons pas analyser l'évènement ayant mené à commettre l'erreur. Nous ne pouvons donc pas définir avec certitude le type selon cette classification. Nous ne pouvons que le supposer.

C'est pourquoi nous avons décidé de définir des paramètres liés à l'état et relatifs au projet. Nous en avons identifié cinq :

- **Les erreurs programmatiques (1)**

Une seule erreur y est glissée. Il s'agit de « l'oubli » du local technique. Cette erreur est un manquement au programme demandé dont les observateurs sont censés vérifier la complétude durant la revue.

- **Les erreurs fonctionnelles (6)**

Nous définissons ce type comme toute erreur causant l'inutilisabilité d'un lieu ou d'un objet ou sa déficience. Nous rangeons dans cette catégorie, les erreurs d'ergonomie, d'aménagement et des bonnes pratiques architecturales. Ce sont pour nous les erreurs les plus courantes lors de la revue au stade d'avant-projet. 6 erreurs entrent dans cette catégorie : le mauvais sens d'ouverture de la porte des toilettes, le mauvais sens d'ouverture de la porte de la douche, l'absence de fenêtre dans une des chambres, l'évier de la cuisine positionné dans le mauvais sens, l'aménagement du bureau ne permettant pas d'ouvrir la fenêtre, la mauvaise dimension de la porte du garage.

- **Les erreurs d'implantation (1)**

Cette catégorie est propre à notre cas de figure. En effet, afin d'apporter une mixité des typologies nous avons intégré un problème d'implantation entre le niveau avant et arrière de la maison. Au vu de l'échelle du projet, celle-ci est la seule dans cette catégorie.

- **Les erreurs de représentation (1)**

Ces erreurs sont principalement dues à une mauvaise représentation de l'intention voulue. Ici, elle correspond au dessin de l'allège de la fenêtre de la chambre qui n'est pas en accord avec les cotes définies sur les plans. Cette erreur peut être comprise de deux façons différentes : soit la cote de l'allège est fausse et la fenêtre est bien dessinée (ce cas correspond plus à une erreur informative décrite ci-dessous), soit la cote de l'allège

est juste et la fenêtre est mal dessinée. C'est cette deuxième option que nous avons envisagée.

- **Les erreurs informatives (1)**

Elles sont définies comme provenant d'un manque d'information permettant une bonne analyse du plan. Ici, l'échelle a volontairement été omise sur les documents. Les participants pouvaient soit la déduire d'une mesure d'un élément standard connu soit la repérait comme un élément manquant.

Nous obtenons donc le tableau synthétique suivant :

Erreur	Qualificatif
Local technique	Programmatique
Problème de niveaux	Implantation
Porte des toilettes	Fonctionnelle
Fenêtre dans la chambre	Fonctionnelle
Allège chambre	Représentation
Évier cuisine	Fonctionnelle
Fenêtre bureau	Fonctionnelle
Porte de garage	Fonctionnelle
La porte de douche	Fonctionnelle
Absence d'échelle	Informatrice

Figure 25 : Tableau synthétique reprenant l'ensemble des types d'erreurs.

ACTIONS

Cette catégorie reprend l'ensemble des interactions que pouvaient réaliser les participants avec les supports à leur disposition. Il faut noter que toutes les interactions n'étaient pas possibles en fonction du cas de figure. Par exemple, lors de la revue 2D, il n'y aura aucune interaction avec la tablette numérique. Nous en avons identifié huit :

- **Annote** : action d'écrire du texte pour effectuer une remarque ou une suggestion. Ne seront reprises dans cette colonne que les annotations textuelles (non graphiques).
- **Dessine** : action de représenter par des formes ou des schémas simples une idée ; à l'exception des annotations textuelles.
- **Mesure** : action de mesurer un élément grâce à l'équerre fournie.
- **Explore la 3D** : action d'utiliser la tablette numérique pour visualiser le modèle.
- **Capture** : action de prendre une capture d'écran de la fenêtre de visualisation permettant d'enregistrer le lieu de la remarque.

- **Commente** : répertorie les commentaires oraux émis par le participant.
- **Réflexion personnelle** : décrit les moments où la personne semble réfléchir et qu'elle n'effectue aucune action « active ».
- **Autre** : catégorise une action n'entrant pas dans une des 7 catégories ci-dessus (maximum 10% des données par expérience).

NIVEAUX D'ABSTRACTION

Nous analysons également ce que nous avons appelé le niveau d'abstraction. Nous le définissons comme l'échelle spatiale à laquelle le participant réalise son analyse. Le principe est donc de découper le projet tel un ensemble de poupées russes. Nous obtenons donc l'échelle graduelle suivante :

- **Niveau 1 - Ensemble/contexte** : fait référence à l'implantation du bâtiment et son rapport avec le contexte environnant.
- **Niveau 2 - Bâtiment** : ensemble des paramètres caractérisant le volume fermé en excluant tous les éléments extérieurs au bâtiment. Exemples : la volumétrie, l'allure des façades, le percement des baies, l'esthétique du volume.
- **Niveau 3 - Intérieur/extérieur** : définit l'analyse de l'espace intérieur ou extérieur du bâtiment ; c'est-à-dire lorsque le sujet regarde l'aménagement intérieur dans son ensemble ou l'aménagement extérieur dans son ensemble. Exemples : analyse des zones de circulation, analyse de la lumière, de relation entre les espaces, répartitions fonctionnelles.
- **Niveau 4 - Pièce** : description ou analyse d'un élément relatif à une pièce précise du bâtiment. Exemples : Superficie d'une chambre, entrée de lumière dans une pièce particulière, aménagement mobilier d'un espace.
- **Niveau 5 - Détail** : permet de définir le plus petit niveau d'abstraction, à l'échelle plus petite d'une pièce de l'habitation. Exemples : le sens d'ouverture d'une porte, d'une fenêtre, la couleur des murs, la hauteur des gardes robes.
- **Autre** : toute autre remarque ne se rangeant pas dans une des catégories précitées (maximum 10% des données par expérience).

OUTILS

Cette catégorie reprend l'ensemble des outils disponibles. Il est important de noter que l'ensemble des outils n'était pas forcément utilisable dans chaque expérience. Ainsi, en revue de plans 2D, l'outil viewer ne pouvait apparaître dans la grille de codage.

L'observation de l'utilisation de l'un ou l'autre outil est plus évidente que les autres catégories déjà abordées. La description de ceux-ci est donc plus succincte. Nous obtenons 7 catégories :

- **Feutres** : outils utilisés pour les annotations ou les dessins.
- **Équerre** : permet de mesurer une longueur ou un angle.
- **Viewer** : permet d'utiliser l'application Augment qui affiche le modèle.
- **Marqueurs** : utilisés pour dessiner ou annoter.
- **Capture d'écran** : outil intégré dans l'application Augment visant à mémoriser un point de vue particulier.
- **Aucun** : permet de décrire les situations où le participant n'utilise aucun outil à sa disposition.
- **Autres** : tout outil ou état n'entrant pas dans les catégories précédentes (maximum 10% des données par expériences).

LA FOCALISATION

Ce critère permet d'analyser ce qui capte l'attention du participant durant le déroulement de l'expérience. Un prédécoupage en 7 catégories avait été défini. Cependant, après le premier visionnage nous avons décidé de créer deux nouvelles catégories. En effet, la catégorie « autres » contenait suffisamment d'occurrences pour justifier la création de nouvelles classes. Nous obtenons donc ces 9 possibilités :

- **Implantation** : décrit toutes les remarques sur l'orientation du bâtiment, la position relative du bâtiment sur la parcelle. (Exemple : « *Le recul de l'habitation est assez prononcé, cela limite la taille du jardin à l'arrière.* »).
- **Programme** : toute remarque relative aux éléments composants le programme distribué dans l'énoncé. (Exemple : « *Je pense que le programme demandait un local technique.* »).
- **Structure** : concerne les remarques relatives à la structure du bâtiment. (Exemple : « *J'ai l'impression qu'il faudrait ajouter un poteau à cet endroit.* »).
- **Fonctionnel** : toute remarque concernant la fonction d'une pièce, d'un objet. (Exemple : « *Je trouve que la cuisine manque de plan de travail.* »).
- **Aménagement** : toute remarque relative à l'aménagement des espaces, tant intérieurs qu'extérieurs. (Exemple : « *Je mettrai plutôt le lit dans l'autre sens.* »).
- **Lumière** : toute remarque relative à l'ensoleillement, l'apport de lumière. (Exemple : « *Je trouve que l'espace de vie va recevoir trop d'ensoleillement en été.* »).

- **Esthétique** : décrit toute remarque émettant un jugement de goût (critère subjectif). (Exemple : « *Le travail du volume est intéressant même si je ne comprends pas bien les raisons des déports des façades.* »).
- **Je ne sais pas** : permet de classer les moments où nous n'avons pas assez d'informations pour ranger l'évènement dans une des catégories.
- **Autres** : concerne les remarques autres que celles citées ci-dessus. (Exemple : « *J'aurais bien aimé voir des cotes sur maquette 3D.* ») (maximum 10% des données par expériences).

3.2.2. AMELIORATION DE LA GRILLE DE CODAGE

Afin d'obtenir un découpage temporel permettant d'encoder l'ensemble des données disponibles, nous avons évolué par dichotomie. Nous avons commencé par un découpage d'intervalles d'une minute, ce qui générerait entre 6 et 15 descriptions par expérience. Cette échelle d'encodage a très vite montré ses limites. En effet, la densité d'informations variant au cours de l'expérience, le découpage par minute ne permettait pas de décrire l'ensemble des événements sur certaines périodes. Nous avons donc décidé de réduire la segmentation en palier de 30 secondes. Celle-ci a permis de doubler la quantité d'informations et de préciser ainsi certains événements. Ensuite, nous avons effectué un troisième zoom en découpant les passages par tranche de 15 secondes. Cependant, ce découpage fut abandonné au vu des trop nombreuses répétitions apparaissant tout au long de l'encodage. Donc, le séquençage par tranche de 30 secondes s'est avéré être le plus adapté pour nos expériences (cette caractéristique étant indépendante du type d'expérience). Nous avons donc finalement un total de 322 lignes qui contenaient chacune 5 caractéristiques ; soit 1610 caractérisations définies.

De plus, nous avons décidé de faire réaliser un encodage test afin de voir si notre grille d'analyse et le thésaurus défini permettaient de reproduire l'expérience à l'identique. Ce test de similitude fut mené afin d'éliminer le paramètre d'interprétation de l'encodeur, notamment en levant certaines ambiguïtés quant aux définitions des termes. Ce travail demandant un très grand investissement en temps, nous avons décidé de ne faire réaliser l'encodage par un autre encodeur pour une seule expérience de chaque type. Ceci fut cependant une chance de confronter la clarté de la grille d'analyse.

Le taux de similitude fut de 91/100 pour l'expérience 2D, 86/100 pour la RA et 99/110 pour l'expérience mixte. Les différences obtenues par rapport à notre encodage peuvent trouver leur explication dans les remarques suivantes :

- Une plus grande utilisation de la case « Je ne sais pas » ou « autres ». En effet, l'avantage de l'observateur-encodeur est qu'il peut faire appel à sa mémoire d'une part et à ses notes personnelles d'autre part qui peuvent ne pas être interprétées de la même manière de la part d'un autre encodeur.
- Des erreurs. Quelques différences ont permis de mettre en évidence que le paramètre d'erreur entre en compte. En effet, le revisionnage des points différents mettait en avant certaines erreurs d'encodage.
- Les paramètres les plus sujets à l'interprétation étaient ceux dans lesquels nous retrouvions le plus de différences entre les deux encodages. Ceux-ci sont le niveau d'abstraction et la focalisation.

Il est évident que les résultats ressortant de cette vérification se doivent d'être nuancés. En effet, malgré qu'elle se veuille standardisée, l'établissement des définitions, le fait d'assister aux expériences en tant qu'observateur et d'interpréter des notes personnelles entraînent probablement une appropriation de la part de l'encodeur.

Nous avons donc apporté les modifications suivantes après cette comparaison : une description plus fine des termes de ces catégories en simplifiant les définitions et en donnant des exemples, une relecture multiple pour y déceler les éventuelles erreurs d'encodage.

3.3. BILAN DES DONNEES UTILISABLES

Maintenant que la réalisation de l'encodage est considérée comme terminée, nous pouvons faire le bilan des données disponibles pour notre analyse.

- Chaque segment de 30 secondes est décrit selon nos 5 critères.
- Chaque expérience contient donc un nombre variable de segments et donc un nombre variable de caractérisations.
- Les 161 minutes encodées ont généré 1850 occurrences. Notons qu'il est parfois possible qu'un segment soit caractérisé par plusieurs occurrences dans une même catégorie. Par exemple, la catégorie des actions est celle en contenant le plus. En effet, un participant peut se retrouver dans une situation où il explore la maquette avec la tablette numérique, il effectue un commentaire verbal et il prend une capture d'écran. Le segment est donc caractérisé par 3 occurrences dans la catégorie « actions ».
- La grille d'encodage est disponible à l'annexe 7.8.
- Chaque participant étant filmé, nous avons également à notre disposition les 10 à 15 minutes d'enregistrement par passage. Ces enregistrements, utiles pour

l'encodage, nous servent également de moyen d'illustration permettant de visualiser des évènements remarquables.

- Pour les expériences 2D et en RA+2D, nous disposons d'un plan et une coupe annotés par participant. Ces documents sont disponibles à l'annexe 7.10. Notons que certains participants n'ont rien annoté sur leur plan ou leur coupe. Ces documents vierges n'ont pas été intégrés aux annexes.
- Enfin pour la RA et la RA+2D, nous disposons également de 95 captures d'écran. Chaque capture permettant d'enregistrer une zone. L'analyse vidéo nous permettait d'attribuer chaque image au moment s'y rapportant.

4. RESULTATS

Nous passons maintenant à la quatrième partie de ce travail consacrée à l'interprétation des données récoltées. Notre méthodologie d'analyse découle de deux facteurs : notre grille de codage et nos questions de recherche.

La grille de codage générée nous permet d'explorer plusieurs méthodes d'analyse. Une première est une analyse quantitative. Ces données seront, analysées à l'échelle du type d'expérience et, dans un second temps, nous réaliserons une étude comparative de celles-ci. Afin d'alléger la lecture des résultats, nous avons sélectionné les données affichées dans cette section. Vous trouverez cependant la grille de codage complète à l'annexe 7.8.

La deuxième partie de l'analyse sera consacrée à une approche plus qualitative. En effet, notre objectif principal sera de relever des caractéristiques nous permettant d'identifier des paramètres répondant à nos questions de recherche. Cette approche, plus en phase avec la quantité de données récoltées, constituera le deuxième angle d'étude.

Pour rappel, 15 étudiants de 3^e bachelier et 2^e master ont participé à cette expérimentation. Ceux-ci étaient répartis aléatoirement pour former 3 groupes de 5 étudiants composés de la plus grande mixité possible. La répartition était la suivante :

N° expérience	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5
2D	2 ^e Master	2 ^e Master	3 ^e Bachelier	3 ^e Bachelier	3 ^e Bachelier
RA	2 ^e Master	3 ^e Bachelier	3 ^e Bachelier	2 ^e Master	2 ^e Master
RA+2D	2 ^e Master	2 ^e Master	3 ^e Bachelier	2 ^e Master	2 ^e Master

Figure 26 : Tableau de répartition des expériences

Nos choix méthodologiques, motivés par nos questions de recherche et notre grille de codage, nous semblent être un moyen pertinent d'apporter des réponses. Cependant, nous sommes conscients que d'autres axes ou méthodes d'encodage auraient également pu mettre en évidence des résultats pertinents. C'est donc avec une grande dose d'humilité, de nuance et d'esprit critique que nous abordons cette dernière partie.

4.1. L'EXPERIENCE 2D

Nous commencerons cette analyse par notre expérience constituant la base comparative qu'est la revue 2D. Les tableaux synthétiques ci-dessous reprennent les données principales des expériences réalisées.

LE TEMPS

N° expérience	Durée de l'expérience	Nombre d'erreurs détectées	Temps 1 ^e erreur	Temps dernière erreur	Temps effectif
Exp 1	08'30''	2	01'00''	03'30''	2'30''
Exp 2	10'00''	3	01'30''	06'00''	4'30''
Exp 3	14'30''	5	01'00''	08'30''	7'30''
Exp 4	07'00''	2	01'30''	3'00''	1'30''
Exp 5	11'30''	3	00'15''	07'00''	6'45''
TOTAUX	51'30''	15	/	/	

Figure 27 : Tableau récapitulatif des expériences 2D

L'encodage dans notre grille de codage, nous permet d'obtenir les valeurs suivantes :

- La durée moyenne d'un passage en 2D est de 10'18''.
- Le nombre total d'erreurs détectées pour l'ensemble des 5 passages est de 15.
Le nombre détectable étant de 50, le taux de détection est de 30%.
- La première erreur est, en moyenne, détectée après 1'03''.
- La dernière erreur est détectée en moyenne après 5'36''.

Afin de compléter les données temporelles de l'expérience, nous avons défini une nouvelle variable : **le temps effectif**. Nous la définissons comme le temps entre la première erreur et la dernière erreur pour chaque expérience. Le but de cette variable est de pouvoir analyser la phase de détection riche en événements et d'en dégager des caractéristiques. Le temps effectif a une moyenne de 4'32'', cela correspond à environ 40% du temps total moyen. Nous remarquons que le rapport entre la durée totale et ce temps effectif varie de 21,4% du temps pour l'expérience 4 et 58,7 % pour l'expérience 5.

LES ERREURS

Types d'erreurs	Nombre d'erreurs trouvées						Pourcentage de répartition de l'expérience	Pourcentage de répartition de départ
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Total		
Programmatique	0	1	0	0	0	1	6,6%	10%
Fonctionnelle	1	1	3	2	2	9	60%	60%
Implantation	0	1	1	0	0	2	13,4%	10%
Représentation	0	0	0	0	0	0	0%	10%
Informative	1	0	1	0	1	3	20%	10%

Figure 28 : Tableau de répartition des différents types d'erreurs

Comme nous l'avons dit plus haut, 15 erreurs sur les 50 possibles ont été détectées. Nous pouvons observer que 4 des 5 types d'erreurs ont été trouvées au moins une fois. Seule l'erreur représentative n'a été repérée par aucun des 5 participants. Les types d'erreurs trouvés par expérience varient en fonction des cas, cependant au moins 1 erreur fonctionnelle a été détectée par chaque participant. Seul un concepteur a détecté une erreur programmatique. Enfin, le pourcentage de répartition de base est respecté pour 3 des 5 types d'erreurs. Les erreurs informatives sont ici deux fois plus détectées que la répartition de base imaginée.

Il faut noter que le nombre de certaines erreurs étant limité à 1, les pourcentages de répartition sont fortement influencés en cas de détection ou non-détection. Ainsi, seul le type fonctionnel représentant 6 des 10 erreurs à détecter peut nous donner des résultats plus significatifs.

N° expérience	Ordre d'apparition				
	Erreur 1	Erreur 2	Erreur 3	Erreur 4	Erreur 5
Exp 1	Informative	Fonctionnelle			
Exp 2	Programmatique	Fonctionnelle	Implantation		
Exp 3	Fonctionnelle	Informative	Fonctionnelle	Fonctionnelle	Implantation
Exp 4	Fonctionnelle	Fonctionnelle			
Exp 5	Fonctionnelle	Informative	Fonctionnelle		

Figure 29 : Tableau reprenant l'ordre d'apparition des erreurs

Notre grille d'analyse nous permet également d'étudier l'ordre d'apparition des types d'erreurs. Ainsi, nous pouvons remarquer que 60% des erreurs détectées en premier sont des erreurs fonctionnelles. Cette répartition correspond à celle imaginée. Les erreurs programmatiques et informatives étant repérées en première ou deuxième position contrairement aux erreurs d'implantation qui n'ont jamais été détectées en première position.

LES PARAMETRES D'ANALYSE COMPLEMENTAIRES

N° expérience	Niveau d'abstraction Moyen	Focalisation Principale	Actions principales	Outils principaux
Exp 1	1,71	Fonctionnel	Annotations textuelles	Feutre > Equerre
Exp 2	2,2	La lumière et l'implantation	Annotations textuelles	Feutre > Equerre
Exp 3	3,14	Aménagement	Annotations textuelles	Feutre > Equerre
Exp 4	3,29	Aménagement	Annotations textuelles / commentaires verbaux	Feutre > Equerre
Exp 5	2,30	Fonctionnel	Annotations textuelles	Feutre > Equerre
Moyenne	2,52	-	-	-

Figure 30 : Tableau des paramètres complémentaires étudiés

Un ensemble de paramètres complémentaires à l'étude des typologies d'erreurs viennent affiner ces résultats.

Comme expliqué au point 3.2.1 de ce travail, le niveau d'abstraction correspond à l'échelle spatiale à laquelle le participant effectue son analyse ou émet ses remarques. Cette échelle graduelle comporte 5 niveaux : 1 = Ensemble, 2 = Bâtiment , 3 = Intérieur/Extérieur , 4 = Pièce , 5 = Détail.

Nous pouvons remarquer que le positionnement moyen d'un participant se situe à un niveau entre l'analyse du bâtiment et son aménagement intérieur/extérieur général.

La catégorie « focalisation principale » reprend les occurrences les plus fréquentes de notre grille de codage pour cette thématique. Un seul terme a généralement été choisi, excepté dans les cas où une presque-égalité apparaissait. La focalisation principale étant ici l'aménagement et le fonctionnel. Une expérience se détache de ces résultats où les remarques ont été plutôt orientées vers la lumière et l'implantation du bâtiment. Ces paramètres liés à l'orientation du bâtiment, les ouvertures, la répartition spatiale possèdent l'un des niveaux d'abstraction le plus bas des 5 expériences. Ces deux

paramètres (le niveau d'abstraction et la focalisation) étant fort corrélés, cela nous semble être un signe positif quant à la méthode de traitement des données choisie.

Les actions constituent également un critère d'analyse intéressant. Nous pouvons remarquer que l'annotation textuelle a été ici préférée à l'annotation graphique pour commenter les documents. L'expérience 4 nous montre que le commentaire verbal fait également partie des moyens de communication de l'information. L'expérience étant enregistrée, les participants étaient libres d'effectuer des commentaires à haute voix. Souvent effectuées comme auto-commentaires ; nous pouvions alors constater que certains étudiants n'ont pas failli à leur réputation de bavard.

Le dernier critère analysé est l'utilisation des outils et des supports. Pour rappel, des feutres, des marqueurs et une équerre étaient à disposition des participants. Comme nous l'avons dit plus haut, les annotations textuelles sont préférées au dessin (figure 31) et c'est le feutre fin qui est préférentiellement utilisé. Le dernier point intéressant est la très faible utilisation de l'équerre. Même si 3 étudiants sur 5 l'ont utilisée au moins une fois, elle ne représente que 10 occurrences comparativement au 67 occurrences du feutre. L'absence d'échelle sur le plan n'a pas poussé les participants à son utilisation.

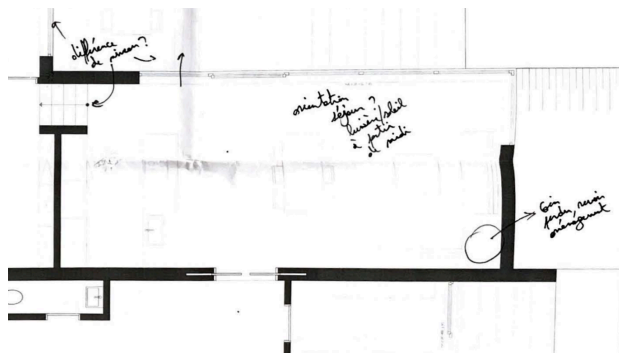


Figure 31 : Exemples d'annotations textuelles réalisées.

Enfin deux types de supports étaient à leurs dispositions. 100% des participants ont utilisé le plan au moins une fois et 1 seul participant a utilisé la coupe et le plan. Le nombre d'annotation sur la coupe se limite à une seule pour l'ensemble des 5 passages.

REPRESENTATION GENERALE

Nous avons réalisé une représentation générale exprimant le déroulement de ces 5 premières expériences. Sur le graphique ci-dessous, nous pouvons visualiser en bleu la durée de chaque expérience et en rouge la position en fonction du temps des erreurs

détectées. Nous avons également représenté en vert la courbe d'erreurs cumulées. Son échelle étant positionnée à droite du graphique (figure 32).

Les paliers d'analyse de 30 secondes ne nous permettent d'obtenir qu'une courbe brisée de ces erreurs cumulées. Cependant, une interpolation des données fait remarquer plusieurs éléments :

- La courbe possède une variation de courbure créant un point d'inflexion. Ce point d'inflexion est positionné dans la zone la plus dense en erreurs détectées.
- Cette courbe possède deux paliers : 1 en début d'expérience et 1 en fin.

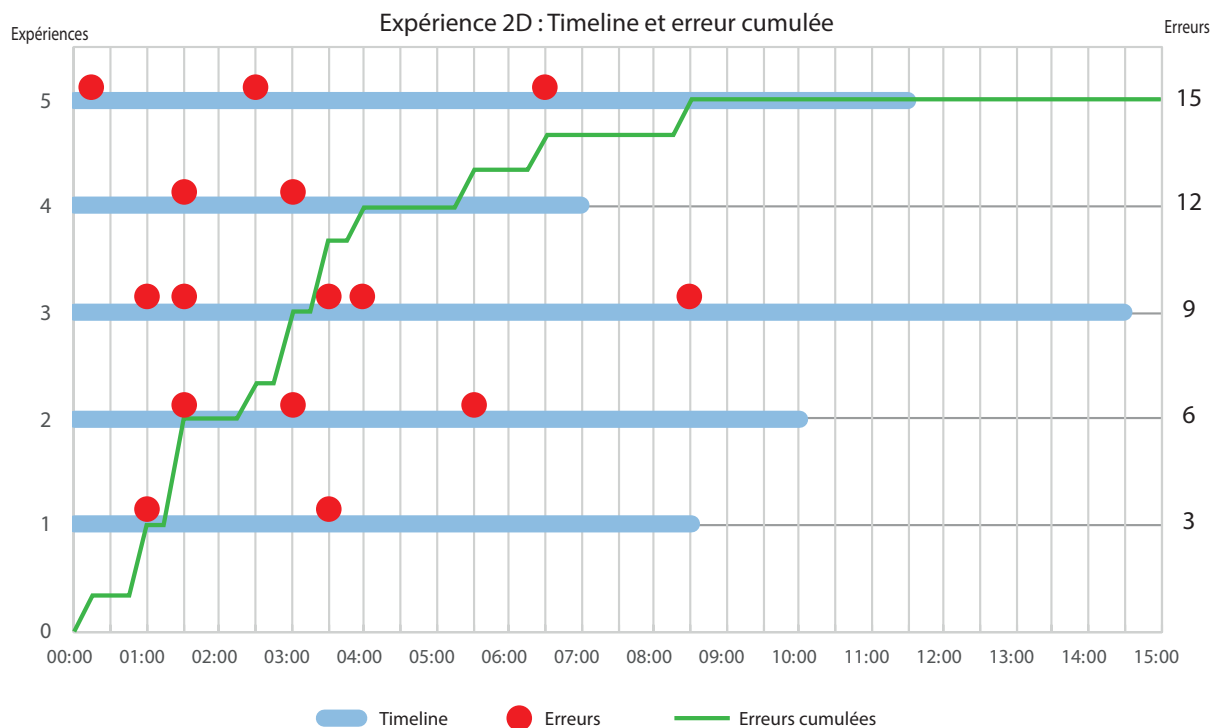


Figure 32 : Graphique du déroulé temporel de l'expérience en 2D

4.1.1. DISCUSSION DES RESULTATS DE LA SITUATION 2D.

Nous allons maintenant passer à la phase de discussion des résultats de cette première situation observée. Cette base de discussion permettra de comparer les conclusions avec les autres types d'expériences réalisées.

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que la revue de projet peut se découper en trois phases :

Une phase avant la détection d'erreur, une phase de détection et enfin une phase post-détection. Nous avons décidé de les nommer respectivement : la phase de découverte, la phase de détection et la phase de vérification. L'existence de cette segmentation au cours du temps est somme toute logique. La manière dont nous abordons la résolution d'un problème semble être similaire dans les 5 cas. Nous prenons d'abord un temps pour prendre connaissance de la situation, nous résolvons le problème et finalement nous vérifions nos données. C'est l'observation que nous faisons ici. La phase de découverte moyenne est d'environ une minute. Nous pouvons donc estimer que c'est le temps nécessaire aux participants pour s'imprégner du plan. Ce temps est relativement court : il varie de quelques secondes à un peu plus d'une minute et 30 secondes.

Deuxièmement, le taux que nous estimons assez faible de découverte des erreurs (30%) nous pousse à nous poser plusieurs questions :

Le temps laissé aux participants était-il suffisant ?

Mentionnons qu'aucune limite de temps n'était donnée aux étudiants, et aucun d'eux n'a dépassé les 15 minutes prévues dans notre programme ; 3 d'entre eux n'excèdent même pas 10 minutes. Nous pouvons néanmoins nous poser une autre question y découlant :

Le temps est-il corrélé au nombre d'erreurs trouvées ?

Nous aurions tendance à répondre par l'affirmative. Avant d'appuyer notre réponse, nous tenons à noter que le choix de mixer les étudiants de 3^e bachelier et 2^e master n'est en rien un signe de variabilité des données. Un étudiant de 2^e master pouvant être considéré comme mieux formé n'amène pas forcément une meilleure performance. La comparaison du temps passé, du nombre d'erreurs trouvées dans les 15 expériences en est ici la preuve. Nous imaginons donc que le niveau de formation nécessaire à la bonne réalisation des expériences correspond plus à un palier à franchir plutôt qu'une ascension constante.

Le temps nous semble donc corrélé au nombre d'erreurs, deux éléments nous permettent de l'affirmer : premièrement, l'observation du tableau du classement des données ordonnées. En effet, en rangeant le nombre d'erreurs détectées dans l'ordre croissant, nous observons clairement ce phénomène :

N° expérience	Durée de l'expérience	Nombre d'erreurs détectées	Temps 1 ^e erreur	Temps Dernière erreur	Temps effectif
Exp 4	07'00''	2	01'30''	3'00''	1'30''
Exp 1	08'30''	2	01'00''	03'30''	2'30''
Exp 2	10'00''	3	01'30''	06'00''	4'30''
Exp 5	11'30''	3	00'15''	07'00''	6'45''
Exp 3	14'30''	5	01'00''	08'30''	7'30''
TOTAUX	51'30''	15	/	/	

Figure 33 : Tableau récapitulatif de l'analyse temporelle

Secondement, la détection des 3 phases nous confirme cette tendance. En effet, la phase de découverte est pratiquement une constante, si nous regardons la phase de vérification qui correspond au temps depuis la dernière erreur jusqu'à la fin de l'expérience, nous trouvons également une faible variabilité. La seule phase variable est donc la phase active de détection. C'est celle-ci qui influe donc sur la détection d'erreurs. Nous remarquons que plus cette phase dure longtemps, plus le nombre d'erreurs trouvées est grand. Au vu de la durée fixe des phases de découverte et de vérification, nous pouvons conclure que plus le temps total passé par un participant croît, plus il augmente son pourcentage de phase active et plus il augmente son nombre d'erreurs repérées.

Existe-t-il une corrélation entre le niveau d'échelle spatiale et le nombre d'erreurs trouvées ?

Nous nous abstenons d'une réponse précise. En effet, les résultats mettent en évidence deux éléments : si nous excluons l'expérience 4 des observations de la première situation, nous observons une corrélation entre ces deux paramètres, cependant l'analyse des autres paramètres nous pousse à répondre par la négative. Effectivement, il arrive souvent qu'une erreur soit détectée non pas car nous creusons l'analyse d'un plan, mais simplement parce que nous sommes attirés par un élément de représentation différent de ce que nous connaissons, ou parce que la représentation d'un élément ou la forme d'un local nous pousse à chercher plus loin. Plusieurs erreurs semblent donc être détectées par des « coups d'œil » tel un aigle sur sa proie. Nous observons plusieurs fois ce phénomène dans nos expériences. Un participant est en train d'analyser une pièce ou un élément et d'un coup, il repère une erreur à un tout autre endroit.

Nous tenons néanmoins à nuancer cette conclusion, car l'étude poussée du comportement des participants n'a pas été réalisée ; elle n'était pas le sujet du présent travail. Elle constitue, cependant, un axe intéressant de prolongement.

4.2. L'EXPERIENCE EN REALITE AUGMENTEE

Nous allons maintenant aborder la description des résultats de l'expérience en RA. 5 participants ont également réalisé l'expérience.

LE TEMPS

N° expérience	Durée de l'expérience	Nombre d'erreurs détectées	Temps 1 ^{re} erreur	Temps Dernière erreur	Temps Effectif
1	15'00''	6	00'30''	10'30''	10'00''
2	7'00''	2	01'30''	03'30''	2'00''
3	10'30''	2	02'00''	6'00''	4'00''
4	10'00''	3	02'00''	6'30''	4'30''
5	9'30''	2	01'30''	4'30''	3'00''
TOTAUX	52'00''	15	-	-	23'30''

Figure 34 : tableau récapitulatif de l'analyse temporelle en RA

Nous allons parcourir les données récoltées et définir les valeurs moyennes, similairement à ce qui a été réalisé plus haut. Ainsi nous pouvons obtenir :

- La durée moyenne d'un passage en RA : 10'24''.
- Le nombre total d'erreurs détectées pour l'ensemble des 5 passages est de 15. Le nombre détectable est ici de 45. En effet, l'erreur représentative n'est, ici, pas détectable, car l'information des cotations n'était pas intégrable sur notre application. L'utilisation d'une maquette 3D comme unique outil présente ici une limite quant au type d'information visualisable. Ce point sera discuté plus loin dans le travail. Le taux moyen de détection est donc de 33,3 %.
- La première erreur est, en moyenne, trouvée après 1'30''.
- La dernière erreur est, en moyenne, repérée après 6'12''.

Les données relatives au temps effectif, défini ci-dessus, nous donnent :

- La durée moyenne effective est de 4'42''. Cette durée représente environ 45% du temps moyen total par expérience.
- La variabilité de ce temps effectif va de 31,6 % pour l'expérience 5 à 66,7 % pour l'expérience 1.

LES ERREURS

Types d'erreurs	Nombre d'erreurs trouvées						Pourcentage de répartition de l'expérience	Pourcentage de répartition de départ
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Total		
Programmatique	0	1	0	0	0	1	6,7%	11,1%
Fonctionnelle	5	0	1	2	1	9	60%	66,7%
Implantation	1	1	1	1	1	5	33,3%	11,1%
Représentation	0	0	0	0	0	0	0%	0%
Informative	0	0	0	0	0	0	0%	11,1%

Figure 35 : Tableau récapitulatif du nombre d'erreurs en RA

Un total de 15 erreurs a été détecté sur les 45 possibles. Nous pouvons observer que 3 des 4 types d'erreurs ont été repérés au moins une fois. Cependant, l'erreur informative n'a été trouvée par aucun des participants. Les types d'erreurs les plus perçus concernent les erreurs fonctionnelles, leur nombre étant plus important cette observation est somme toute logique. Nous pouvons également mentionner que l'erreur d'implantation a été repérée pour tous les cas. Cela génère une différence importante entre la répartition des erreurs de départ et la répartition des erreurs trouvées effectivement. En effet, nous observons une différence de facteur trois entre les deux données. Nous pouvons également noter que l'erreur programmatique n'a été détectée qu'une seule fois sur les cinq expériences.

N° expérience	Ordre d'apparition					
	Erreur 1	Erreur 2	Erreur 3	Erreur 4	Erreur 5	Erreur 6
Exp 1	Fonctionnelle	Fonctionnelle	Fonctionnelle	Implantation	Fonctionnelle	Fonction.
Exp 2	Progr. ⁷	Implantation				
Exp 3	Implantation	Fonctionnelle				
Exp 4	Fonctionnelle	Implantation	Fonctionnelle			
Exp 5	Implantation	Fonctionnelle				

Figure 36 : Tableau récapitulatif de l'ordre d'apparition des erreurs en RA

L'ordre d'apparition des erreurs est ici différent des résultats observés en deux dimensions. En effet, 40% des erreurs détectées en premier lieu sont des erreurs fonctionnelles, 40% sont des erreurs d'implantation et 20% sont des erreurs

⁷ Abréviation du terme programmatique

programmatisques. Cette répartition confirme donc les différences observées ci-dessus pour les erreurs d'implantation.

LES PARAMETRES D'ANALYSE COMPLEMENTAIRES

N° expérience	Niveau d'abstraction moyen	Focalisation principale	Actions principales	Outils principaux
Exp 1	3,63	Fonctionnel > Aménagement	Exploration 3D et commentaires verbaux	Viewer
Exp 2	2,07	Aménagement > Implantation	Exploration 3D et commentaires verbaux	Viewer
Exp 3	2,62	Fonctionnel	Exploration 3D et commentaires verbaux	Viewer
Exp 4	2,9	Aménagement	Exploration 3D et commentaires verbaux	Viewer
Exp 5	2,68	Aménagement	Exploration 3D et commentaires verbaux	Viewer
Moyenne	2,78	–	–	–

Figure 37 : Tableau récapitulatif des paramètres complémentaires

Les paramètres complémentaires étudiés sont ici plus réduits. En effet, les outils disponibles dans le cas de la revue de la maquette 3D sont imposés. Seules la tablette et les fonctions en découlant sont disponibles. Le participant n'a donc d'autres solutions que de s'en servir ou arrêter l'expérience. Cette caractéristique influe également sur les actions. Le participant n'a, à sa disposition, que l'outil de capture d'écran et le commentaire verbal pour s'exprimer. L'annotation en temps réel sur la tablette n'étant pas possible, on retrouve des résultats triviaux pour cette thématique. Nous ne pouvons donc analyser que l'action ou l'inaction du participant.

Les autres paramètres nous apprennent cependant que :

- La moyenne du niveau d'abstraction est de 2,78, nous atteignons donc presque que le niveau d'analyse global intérieur/extérieur.
- Les deux thématiques de focalisation principales sont l'aménagement et le fonctionnel en nette avance devant les troisièmes paramètres arrivant à égalité qui sont l'esthétique et l'implantation.
- Le viewer (c'est-à-dire la tablette) est évidemment l'outil utilisé en permanence. Cependant, nous remarquons une forte utilisation de l'outil « capture d'écran » avec un nombre de captures par expériences moyen de 12. Cette utilisation est élevée : elle permet de figer une remarque sur un endroit. De plus, son utilisation

étant extrêmement simple et naturelle a très certainement poussé les utilisateurs à s'en servir. Chaque commentaire verbal était généralement accompagné d'une capture d'écran.

REPRESENTATION GENERALE

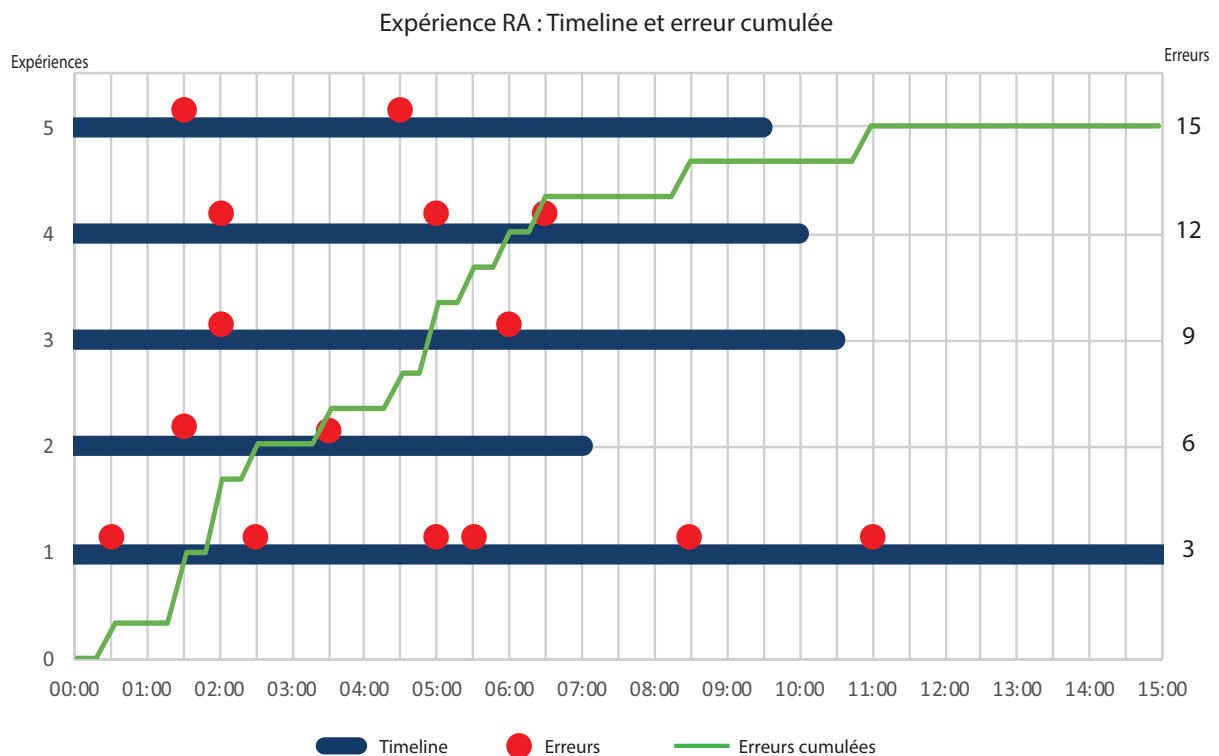


Figure 38 : Graphique du déroulé temporelle de l'expérience en RA

4.2.1. DISCUSSION DES RESULTATS DE LA SITUATION EN RA.

Premièrement, comme décrit dans l'expérience 2D, nous pouvons scinder le déroulement en trois phases : la découverte, la détection et enfin la vérification. Ces dernières sont découpées en relation avec l'évolution de la courbure de l'erreur cumulée. Nous pouvons remarquer que le temps moyen de la phase de découverte qui est d'1'30'' est plus long pour la RA que la 2D. Cette différence peut être induite par une donnée principale : l'utilisation de la tablette numérique étant considérée comme « nouvelle », elle demande plus de temps pour s'acclimater à son utilisation. La phase de démarrage de détection se voit ainsi repoussée d'un segment de 30 secondes. Nous pouvons appuyer cette analyse par les commentaires émis par deux des sujets : « Ça va, au début j'avais un peu de mal avec l'application, mais maintenant je suis à l'aise » ou encore : « J'ai compris le truc ». Malgré l'augmentation de temps de cette phase de découverte, la différence n'est que d'une trentaine de secondes et peut être interprétée comme un

signe positif envers l'utilisation de nouveaux outils. En effet, les participants semblent finalement très peu perturbés par l'utilisation de la tablette et la « perte de temps » d'acclimatation est somme toute assez négligeable à l'échelle d'une revue de projet.

Comme nous l'avons exprimé plus haut, l'erreur d'implantation a été détectée dans 100% des expériences. Cependant, si nous analysons la focalisation pour ce paramètre (voir figure 37), nous pouvons remarquer qu'il ne constitue qu'une mineure partie du temps et n'est que la troisième ou quatrième thématique explorée par les participants. Cette contradiction met un élément en évidence :

L'utilisation d'un modèle en réalité augmentée, influe-t-elle sur la focalisation ? Permet-elle de concentrer notre attention sur d'autres éléments qu'une revue classique ?

Il semblerait que oui... et non. En effet, le centre d'attention des participants est similaire dans les deux types d'expériences, c'est l'aménagement et le fonctionnel qui ressortent. Cependant, là où 100% des participants repèrent l'erreur d'implantation, seuls 40% des participants la détectent en 2D pour un nombre d'erreurs et un temps total presque identique (51'30" en 2D et 52'00" en RA). De plus, l'analyse des occurrences d'implantation nous montre un deuxième élément : les occurrences d'implantation pour la 2D sont de 14 segments de 30 secondes pour 11 en RA. Le temps passé par les participants sur cette thématique est donc plus grand en 2D qu'en RA, cependant, la proportion d'erreurs d'implantation est bien plus grande en RA qu'en 2D. La RA semble donc mettre en évidence certaines erreurs en lien avec les caractéristiques de la technologie. Ici, la visualisation 3D du terrain semble améliorer la compréhension de celui-ci.

Les résultats de la RA nous montrent également un autre élément intéressant : 0% des erreurs informatives n'a été trouvé. Notre cas intégrait un point pourtant crucial de la représentation en architecture qui est l'échelle de représentation. Celle-ci, volontairement manquante, n'a jamais été évoquée durant les 5 expériences. Les candidats ne se sont jamais demandé à quelle échelle le modèle était projeté ni si celle-ci pouvait être variable. Deux raisons à ce constat : l'utilisation d'écran de taille fixe bride peut-être ce réflexe de connaissance de l'échelle 3D. En effet, lorsque nous imprimons un plan, nous choisissons le format du papier en fonction de l'échelle voulue. A contrario, lorsque nous souhaitons afficher un élément sur un écran nous nous adaptons à la taille de celui-ci. De plus, notre habitude à pouvoir zoomer ou dézoomer un élément sur une plateforme numérique tel

un écran d'ordinateur ou, simplement, l'écran de notre smartphone, nous offre une autre perspective sur la notion d'échelle.

Cette absence d'échelle est préjudiciable quant à la détection des erreurs ?

Nous pouvons défendre les deux points de vue. En effet, le nombre détecté, les types détectés ne semblent pas différents en 2D et en RA. Nous pouvons remarquer que les participants faisaient naturellement appel à leur expérience personnelle en émettant des suppositions. Ces dernières remplacent alors leurs possibilités de connaître l'échelle exacte ; par exemple : « Il me semble que la porte de garage est trop petite », « La portée des éléments est peut-être trop grande ». Chaque commentaire était donc supposé sur base de connaissances et d'appréciations. Remarquons également que le souhait de pouvoir prendre une mesure n'a jamais été évoqué.

Quelles implications dans la revue de projet ? Ce paramètre est pour nous un élément pouvant amener à des événements préjudiciables. Le niveau de précision n'étant plus vérifié, mais estimé, cela peut entraîner des approximations douteuses, qui peuvent conduire à des erreurs graves dans la suite du processus de conception. L'utilisation d'un modèle numérique 3D comme unique support ne semble pas être un meilleur outil que le support papier bien connu de tous. De plus comme nous l'avons décrit plus haut, certains éléments ne sont simplement pas vérifiables sur un modèle 3D.

4.3. L'EXPERIENCE MIXTE

Nous arrivons maintenant aux résultats des expériences mixtes. Pour rappel, dans cette revue les participants avaient à leurs dispositions les documents 2D et la maquette en RA. Le choix d'utilisation de l'un ou l'autre support était libre et pouvait être modifié, par chaque sujet, en cours d'expérience.

LE TEMPS

N° expérience	Durée de l'expérience	Nombre d'erreurs détectées	Temps 1 ^{re} erreur	Temps Dernière erreur	Temps effectif	Participant
1	13'00''	2	05'30''	12'00''	6'30''	2 ^e Master
2	11'00''	3	00'30''	02'30''	2'00''	2 ^e Master
3	12'30''	2	01'30''	8'30''	7'00''	3 ^e Bachelier
4	11'00''	2	01'00''	4'30''	3'30''	2 ^e Master
5	10'00''	4	01'30''	4'30''	3'00''	2 ^e Master
TOTAUX	57'30''	13	-	-		-

Figure 39 : Tableau récapitulatif de l'analyse temporelle de l'expérience mixte.

L'observation des données temporelles nous permet de dégager les éléments suivants :

- La durée moyenne d'un passage en est de 11'30''.
- Le nombre total d'erreurs détectées pour l'ensemble des revues est de 13 sur 50. Cela représente un taux moyen de détection de 26%.
- La première erreur est, en moyenne, détectée après 2'00''.
- La dernière erreur est, en moyenne, repérée après 6'24''.
- Le temps effectif moyen est de : 4'24'' cette durée représente environ 40% du temps moyen total par expérience.

LES ERREURS

Types d'erreurs	Nombre d'erreurs trouvées						Pourcentage de répartition de l'expérience	Pourcentage de répartition de départ
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Total		
Programmative	0	0	0	0	0	0	0%	10%
Fonctionnelle	1	2	0	1	3	7	53,8%	60%
Implantation	1	1	1	1	1	5	38,5%	10%
Représentation	0	0	0	0	0	0	0%	10%
Informative	0	0	1	0	0	1	7,7%	10%

Figure 40 : Tableau récapitulatif du nombre d'erreur pour l'expérience mixte.

Les résultats montrent que seuls 3 types d'erreurs sur les 5 ont été repérés. Les deux non trouvés sont les types représentatif et programmatique. La majeure partie détectée concerne les erreurs fonctionnelles. Comme sur les deux autres expériences la répartition est proche de celle imaginée. Seules les erreurs d'implantation s'écartent des suppositions de départ. Comme observée en RA, nous remarquons ici une différence d'un facteur 3,8 entre les répartitions de départ et celles des erreurs trouvées effectivement.

N° expérience	Ordre d'apparition					
	Erreur 1	Erreur 2	Erreur 3	Erreur 4	Erreur 5	Erreur 6
Exp 1	Implantation	Fonctionnelle				
Exp 2	Fonctionnelle	Implantation	Fonctionnelle			
Exp 3	Implantation	Informative				
Exp 4	Implantation	Fonctionnelle				
Exp 5	Fonctionnelle	Fonctionnelle	Fonctionnelle	Implantation		

Figure 41 : Tableau de l'ordre d'apparition des erreurs pour l'expérience mixte.

L'ordre d'apparition des erreurs est ici similaire à l'expérience réalisée en RA. 60% des erreurs détectées en premier lieu sont des erreurs d'implantation alors que 40% sont des erreurs fonctionnelles.

LES PARAMETRES COMPLEMENTAIRES

N° expérience	Niveau d'abstraction moyen	Focalisation principale	Actions principales	Outil principal
Exp 1	2,62	Aménagement > Fonctionnel	Exploration 3D et commentaires verbaux	Viewer
Exp 2	2,64	Aménagement = Fonctionnel	Commentaires verbaux et annotations textuelles	Feutre > Viewer
Exp 3	1,46	Autre	Exploration 3D	Viewer > Aucun
Exp 4	2,42	Aménagement	Exploration 3D et commentaires verbal	Viewer
Exp 5	2,9	Fonctionnel > Aménagement	Exploration 3D et commentaires verbal	Feutre > Viewer
Moyenne	2,4	–	–	–

Figure 42 : Tableau récapitulatif des paramètres complémentaires de l'expérience mixte.

Contrairement à la RA et à la 2D, nous disposons de l'ensemble des paramètres étudiés séparément pour les deux expériences précédentes. En effet, en plus des outils « 3D » le

participant peut utiliser les outils 2D. Tout d'abord, nous pouvons observer que la moyenne du niveau d'abstraction est légèrement en dessous des deux autres expériences, nous obtenons une différence de 4% entre la revue 2D et RA+2D et une différence de 15% entre la RA et RA+2D.

L'utilisation des deux outils ne modifie pas la focalisation principale des participants, ce sont toujours l'aménagement et le fonctionnel que nous retrouvons en premières places. Ces deux thématiques sont néanmoins suivies par l'esthétique dans 2 des 5 situations. Les actions principales diffèrent selon les supports utilisés. L'utilisation de la tablette étant majoritaire, l'exploration 3D est l'action la plus fréquente. Seule l'expérience 2 se démarque avec l'apparition de l'annotation textuelle. Les résultats d'utilisation des outils suivent également la même tendance, on retrouve le viewer comme outils principal suivi par le feutre.

LA REPARTITION 2D/RA

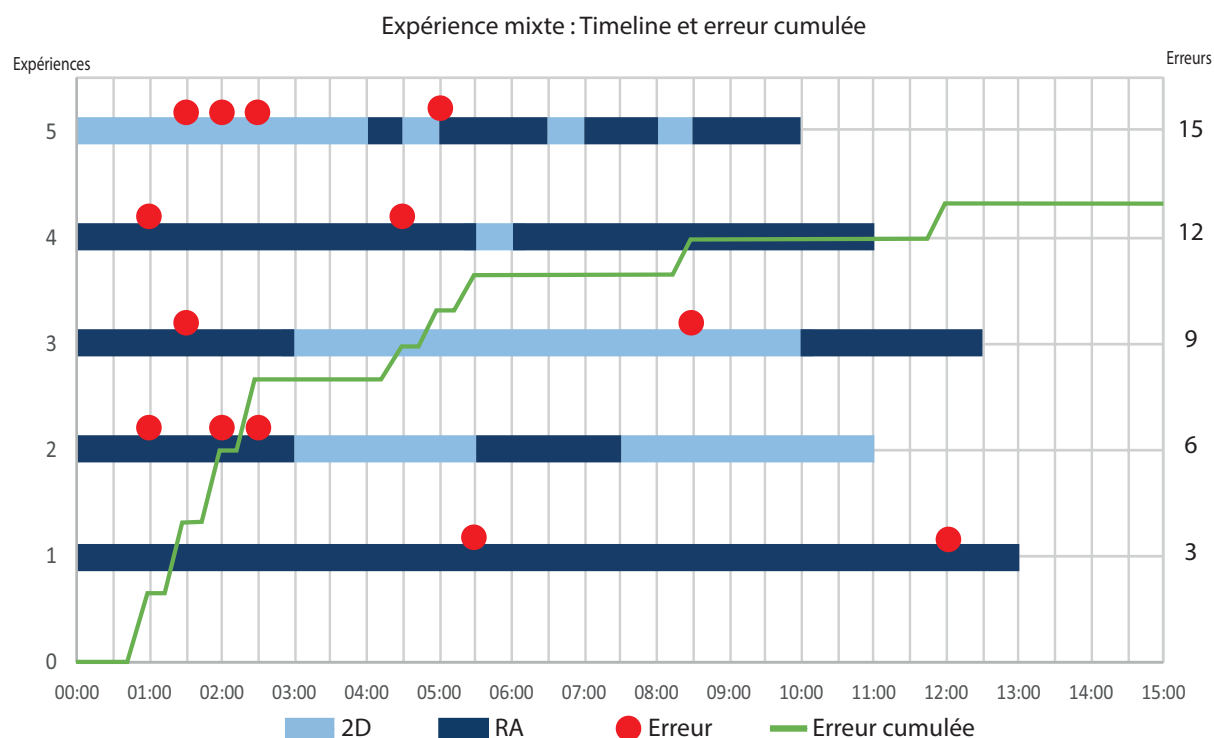


Figure 43 : Graphique du déroulé temporel de l'expérience mixte.

Nous allons maintenant analyser la répartition entre le temps passé sur les supports 2D et les supports RA. Nous pouvons voir sur le graphique ci-dessus les éléments suivants :

- 4 des 5 participants ont décidé de commencer avec les supports 3D. Notons que 80% des participants terminent avec ces mêmes supports.

- 1 seul des participants n'a utilisé qu'une seule des deux options, alors que chaque participant a au moins essayé la RA.
- 65% des erreurs ont été détectées en RA et 35% en 2D.
- 67% du temps est passé en RA et 33% en 2D.
- Le nombre d'allers-retours entre les dispositifs est variable. Il va de 0 à 4.

N° expérience	Durée de l'expérience	Nombre d'erreurs détectées	Temps en 2D	Temps en RA	Temps effectif
1	13'00''	2	0'00''	13'00''	6'30''
2	11'00''	3	6'00''	5'00''	2'00''
3	12'30''	2	7'00''	5'30''	7'00''
4	11'00''	2	0'30''	10'30''	3'30''
5	10'00''	4	5'30''	4'30''	3'00''
TOTAUX	57'30''	13	19'00''	38'30''	22'00''

Figure 44 : Tableau récapitulatif de l'analyse temporelle en RA+2D

4.3.1. DISCUSSION DES RESULTATS DE L'EXPERIENCE MIXTE

Comme nous pouvons le constater sur la figure 39, la variabilité des résultats de cette troisième expérience est plus élevée comparée aux deux autres expériences. Ce phénomène peut s'expliquer par une raison principale : le nombre d'outils proposés. En effet, en multipliant les possibilités offertes aux participants, nous décuplons les possibilités d'utilisation et donc les profils de résultats. Ce phénomène s'est clairement vérifié ici. Chaque participant réalise sa revue selon ses affinités avec les systèmes proposés. Ainsi, certains préfèrent choisir un outil et le garder, d'autres préfèrent les allers-retours. Cette variabilité nous pousse donc à faire preuve de prudence lors de l'étude de certains paramètres.

Comment pallier ce phénomène ? Le premier réflexe aurait été de doubler la taille de l'échantillon afin d'en diminuer la variabilité. Cependant, doubler la quantité de participants pour cette expérience impliquait de faire de même pour les deux précédentes afin de ne pas créer un déséquilibre statistique. Donc, cela signifiait que nous devions disposer de 30 participants. Cette possibilité n'était malheureusement pas réalisable dans le cadre pédagogique dans lequel s'inscrit ce travail. Nous opterons donc pour la seconde option : redoubler de vigilance critique quant à l'analyse quantitative et baser notre raisonnement sur une analyse plus qualitative des événements observés.

Tout d'abord, nous remarquons que le découpage en trois phases apparaît également, mais la constance des phases 1 et 3 est moins évidente. Si nous analysons la courbe d'erreurs cumulées superposée au déroulé temporel, nous voyons clairement que son profil est différent. Nous observons que la phase de détection possède deux pentes différentes et peut être découpée en deux parties : une zone très dense en détection marquée par une pente forte, la plus élevée observée sur l'ensemble des résultats et une seconde pente plus faible. Cette observation nous fait penser à une analyse à deux vitesses. En effet, nous pouvons voir que, lorsque l'expérience commence, le participant effectue tout d'abord un choix d'outil et va le conserver pendant, en moyenne, 4'00". Les observations précédentes nous montraient que la phase de découverte avait une durée de 1'00" à 1'30" en moyenne. Nous pouvons donc considérer que lorsque le concepteur effectue son premier changement de support, il se situe dans la phase active de détection. Si nous observons le premier plateau de l'erreur cumulée, nous pouvons voir qu'il coïncide avec la moyenne avant le premier changement, c'est à ce moment que la perte de vitesse apparaît. Ce ralentissement peut être interprété de la manière suivante : d'abord, le participant va perdre naturellement quelques secondes pour changer de support. Ensuite, ce changement génère un nouveau temps d'adaptation et une nouvelle phase de découverte. Ce plateau de 1'30" semble appuyer notre interprétation. Enfin, la perte de vitesse observée semble normale. D'une part, le participant a déjà trouvé quelques erreurs, il lui en reste donc moins à détecter et il a donc statistiquement moins de chance d'en trouver. D'autre part, le changement répétitif de plateforme génère une perte de quelques secondes à chaque fois que l'évènement se produit. L'addition de tous ces paramètres appuie cette observation de l'existence de deux vitesses dans cette phase.

Ensuite, cette expérience nous permet d'évaluer l'intérêt pour l'utilisation de ce nouvel outil. Comme décrit plus haut, nous voyons que 80% des participants décident de commencer par la RA et 80% terminent avec ce même outil. Au final, nous avons une répartition temporelle découpée comme suit : 65% du temps passé se fait en RA et 35 % en 2D.

Quelles sont les causes poussant les participants à utiliser majoritairement la RA ?

Notre observons deux facteurs : le premier est l'envie d'essayer de nouveaux outils. En effet, il serait absurde de nier que l'utilisation d'un format non conventionnel suscite une curiosité chez les participants. Ils profitent donc de ce début d'expérience pour simplement tester cette nouveauté. Ce facteur s'appuie également sur les mots-clés relevés lors de la réalisation des expériences et des interviews informelles. En effet, les

participants utilisaient très régulièrement les mots : « fun », « cool », « ludique » pour caractériser l'outil de réalité augmentée. Seul un participant ne partageait pas cet avis. La seconde cause réside dans l'intérêt du participant d'utiliser la RA comme moyen de compréhension du terrain et comme outils de vérification des plans.

4.4. DISCUSSION GENERALE

Nous allons maintenant aborder la discussion générale. Les discussions précédentes nous ont permis de relever les points intéressants de chaque type d'expérience. L'objectif de cette discussion finale est de prolonger notre analyse en croisant les résultats obtenus. Nous compléterons ainsi les réponses à nos questions de recherche.

La réalité augmentée apporte-t-elle un meilleur niveau de compréhension et d'analyse d'un projet d'architecture par rapport aux méthodes dites « classiques » ?

Nous aurions tendance à répondre non à cette première question. En effet, l'observation du tableau synthétique suivant nous permet d'apporter des éléments de réponses :

Type d'expérience	Durée totale	Durée moyenne	Nombre d'erreurs détectées	Niveau d'abstraction moyen	Temps effectif moyen
2D	51'30''	10'18''	15	2,52	4'32''
RA	52'00''	10'24''	15	2,78	4'42''
RA+2D	57'30''	11'30''	13	2,40	4'24''

Figure 45: Tableau récapitulatif des données temporelles des trois expériences.

Ce tableau nous permet de comparer les trois types d'expériences selon 5 critères : la durée totale, la durée moyenne, le nombre d'erreurs détectées, le niveau d'abstraction et le temps effectif moyen.

La compilation de ces paramètres nous amène à la conclusion suivante : l'expérience 2D semble être le format de revue le plus efficient dans notre situation. En effet, si nous comparons le nombre d'erreurs détectées, les deux types d'expériences arrivent à ex aequo. Cependant, si nous définissons le taux de détection d'erreurs par minute de chaque expérience nous obtenons les résultats suivants : 0,29 pour la 2D, 0,28 pour la RA et 0,22 pour l'expérience mixte. Ce nombre nous montre donc que c'est en 2D que nous passons le moins de temps pour déterminer un même nombre d'erreurs. Les deux autres paramètres viennent appuyer nos observations. Le niveau moyen d'abstraction est plus faible en 2D qu'en RA. Cette donnée nous montre que même si notre échelle spatiale d'analyse est en moyenne plus faible, nous arrivons quand même au même nombre d'erreurs détectées qu'en RA. Cela signifie donc qu'un point de vue plus global sur le projet nous permet quand même de détecter les erreurs à une échelle spatiale élevée au sens de notre échelle graduelle, définie plus haut dans ce travail. Enfin, le temps effectif

moyen va également dans le sens de nos conclusions. La phase active pourtant plus courte en 2D permet d'obtenir un résultat équivalent en nombre d'erreurs détectées.

Notons que la différence entre ces deux résultats est minime. Ainsi, même si la conclusion laisse penser que l'expérience 2D est la « grande vainqueur » de notre travail, nous pouvons les considérer sur un – presque – même pied d'égalité au niveau quantitatif de détection d'erreurs. Ce point démontre bien que la RA ne se détache pas positivement de la 2D.

Nous pouvons alors nous questionner sur la baisse des performances lorsque nous cumulons les deux outils. Comme discuté plus haut, l'utilisation des deux outils ne semble pas apporter une plus-value à l'une des deux solutions prises séparément. Nous pouvons observer qu'elle dessert plutôt les supports. Nous constatons ainsi une baisse du nombre d'erreurs détectées, une augmentation du temps total passé et surtout une baisse du temps effectif moyen, malgré l'augmentation de 10% du temps total. Nous concluons donc que si la réalité augmentée n'amène pas une compréhension supérieure ou une meilleure analyse dans le cadre de notre expérience, la RA reste néanmoins un outil tout aussi intéressant à explorer.

Il est important d'apporter un regard critique à cette conclusion. Le cadre de notre étude est très ciblé : la taille du projet, le profil des participants tous issus de la même formation et au même stade d'apprentissage, la complexité du projet, le cadre pédagogique, en font des paramètres qui ne permettent pas d'étendre ces résultats à d'autres cas de figure. De plus, la taille de notre échantillon semble également jouer un rôle dans les aboutissants de cette étude.

La réalité augmentée permet-elle une analyse d'autres facteurs n'apparaissant pas habituellement ? En d'autres termes, la focalisation varie-t-elle en fonction des supports ?

Notre avis est plus tranché. Comme nous l'avons vu dans le descriptif des résultats, la focalisation est assez corrélée avec les supports. En effet, nous avons pu voir que les participants sont plus à même de détecter une erreur informative en 2D qu'en RA, que l'erreur d'implantation est clairement mise à l'avant-plan grâce à la visualisation 3D du terrain. La notion de l'échelle de représentation est abordée différemment selon le type d'expérience, nous avons vu qu'elle suscite plus d'intérêt en 2D qu'en RA. L'expérience mixte confirme ces propos. En effet, la seule occurrence traitant de l'absence d'échelle est apparue lorsque le participant passe du modèle 3D au plan. Nous soulevons donc cette question : pourquoi est-ce la première information recherchée sur un plan alors

qu'elle n'est jamais envisagée lorsque nous visionnons un modèle 3D ? Observerions-nous le même phénomène avec une maquette physique ?

La réalité augmentée est-elle un outil pertinent à la revue d'avant-projet ? Pour toutes les raisons précitées, nous pensons qu'elle est en effet un outil pertinent. Cependant, elle ne s'avère pas être un meilleur outil que les solutions existantes. Nous avons vu qu'elle influe plutôt sur le paramètre qualitatif plutôt que quantitatif, par une focalisation différente. Ainsi, il faudra choisir un support en fonction des paramètres que l'on souhaite observer.

5. CONCLUSION

Ce travail nous a permis d'explorer le domaine de la réalité augmentée et la manière de l'utiliser efficacement dans la revue de projet d'architecture. Cette technologie florissante ouvre de nouvelles perspectives sur de nouveaux usages. C'est un de ceux-ci que nous avons décidé d'explorer. En effet, encore très peu utilisée dans le domaine de la conception, la réalité augmentée intéresse les grandes entreprises qui investissent des moyens considérables dans son développement, il était donc légitime de se poser la question de l'utilité de cette technologie en conception. C'est par la réalisation d'une expérimentation dans laquelle nous avons observé 15 étudiants plongés dans la peau de reviewers que nous avons tenté d'amener des réponses sur les apports de cette technologie. Découpés en trois groupes, ces 15 concepteurs ont réalisé une revue d'un avant-projet dans trois situations différentes : à l'aide de documents 2D, à l'aide d'une maquette en réalité augmentée et à l'aide de l'ensemble des deux solutions. Leur but était d'identifier un maximum d'erreurs volontairement glissées dans le projet.

Nous avons ensuite mis en place un système de traitement des données permettant de formuler une analyse quantitative et qualitative.

Ainsi, nous avons pu mettre en lumière les avantages et inconvénients de cette technologie. Nous avons constaté que ses apports sont finalement limités. Comparable à une solution classique, la réalité augmentée ne semble pas apporter une plus-value notable sur le plan d'aide à la détection d'erreur.

Cependant, nous avons constaté que la réalité augmentée influençait la focalisation du concepteur. En effet, son utilisation favorise la mise en évidence de certaines caractéristiques liées aux fonctions intrinsèques de l'application. Ainsi, les éléments 3D d'échelle spatiale faible comme une topographie ou une volumétrie sont des critères inconsciemment plus étudiés lors de l'utilisation de l'outil.

De plus, nous avons pu observer une typologie de méthode de revue de projet. En effet, les expériences ont mis en évidence l'existence de trois phases lors d'une revue de projet. Une première de courte durée dite de découverte et dédiée à la prise de connaissance, une deuxième considérée comme la phase active dans laquelle nous remarquons une forte activité liée à la détection d'erreurs et enfin une troisième phase dite de vérification. En outre, nous avons également constaté que les phases de découverte et de vérification avaient tendance à être constantes. Cette observation nous a permis de remarquer une

corrélation entre le temps passé en mode actif à une tâche de revue de projet et la qualité finale de ce travail caractérisé par un nombre d'erreurs détecté élevé.

5.1. LIMITES RENCONTREES

Durant ce travail, à plusieurs reprises, nous avons été confronté à des limites de différents types : des limites technologiques, temporelles, pratiques, ou scientifiques.

Nous allons parcourir l'ensemble de ces limites rencontrées dans l'ordre chronologique du développement de cette étude.

La première limite rencontrée dans ce travail est bien sûr la limite du champ d'observation. Notre curiosité nous poussait à explorer une variété de possibilités. Cependant, afin de fournir un travail de qualité scientifique, nous avons dû faire un premier choix du sujet. En choisissant d'étudier l'apport de la RA à la revue de projet, nous avons donc renoncé et limité notre champ d'étude qui ne constitue qu'une petite partie de notre thématique.

Ensuite, nous avons fait face à une limite technologique. En effet, les visions quasi permanentes d'images mettant en scène des systèmes technologiques révolutionnaires nous font parfois oublier le réel avancement de ces outils. Les outils de réalité augmentée ne sont toujours, aujourd'hui, qu'au stade de développement. Aucun système ne peut être considéré comme mature au sens technologique du terme. Ainsi, notre recherche de solution la plus complète nous a forcé à faire marche arrière par rapport aux fonctionnalités que nous avions imaginées. En effet, comme expliqué dans la partie « choix de l'application », l'idée de pouvoir générer des coupes, d'utiliser un tracker personnalisé ou de faire évoluer la course du soleil ont dû être abandonnées.

D'autres limites liées à la réalisation de l'expérience sont également apparues. D'abord, en ce qui concerne notre échantillon, nous avons eu la chance de pouvoir disposer de 15 personnes ayant un profil similaire pour la réalisation. Ce nombre composait une base nous permettant de tirer des résultats par l'analyse quantitative. Néanmoins, l'augmentation de cet échantillon aurait pu apporter plus de pertinence et peut-être plus de nuances aux résultats. Cependant, le temps imparti pour la réalisation ne nous permettait pas d'envisager d'analyser un échantillon 3-4 fois plus grand. De plus, la participation à l'expérimentation se faisait sur base volontaire. Nous nous considérons donc chanceux d'avoir convaincu ce panel.

Enfin, la dernière limite est celle de nos connaissances scientifiques. En effet, ce travail faisait appel à plusieurs notions : la conception architecturale, la notion d'erreur, le comportement humain, les interactions homme-machine... Notre angle d'analyse nous a focalisé sur un seul de ces nombreux paramètres, la notion d'erreur. C'est pourquoi nous voulons rappeler toute l'humilité avec laquelle nous écrivons ces conclusions.

5.2. PERSPECTIVES D'AMÉLIORATIONS, POUR ALLER PLUS LOIN

Les perspectives d'améliorations sont multiples. Nous avons, en effet, soulevé plusieurs suggestions permettant d'explorer certains domaines rejetés dans notre travail.

La première perspective d'amélioration est d'abord liée au développement technologique. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, nous avons dû faire marche arrière sur plusieurs fonctionnalités imaginées. Cependant, la vitesse d'évolution des outils technologiques est un paramètre n'influençant que positivement notre expérience. En effet, nous pouvons supposer que les solutions ne vont cesser de se multiplier, les fonctionnalités et les stabilités des applications ne vont aller que vers un futur meilleur. À titre d'exemple, à l'heure où nous concluons ce travail, nous pouvons faire un rapide bilan sur l'évolution des outils. En effet, la société Trimble propriétaire du logiciel Sketchup a récemment sorti une application, Sketchup Viewer, dédiée à la réalité augmentée. Les fonctionnalités sont multiples : la gestion de calques telle qu'on la retrouve dans le logiciel, la création de scènes préétablies, la mise à l'échelle 1 :1 du modèle et la compatibilité avec certains masques de réalité augmentée a également été annoncée. Nous voyons donc que le domaine est en pleine effervescence et nous ne doutons pas que les possibilités ne feront que s'élargir.

La seconde perspective d'évolution est liée à notre méthode d'analyse. En effet, nous avons choisi un axe focalisant notre analyse sur la détection d'erreurs. Cependant, les enregistrements nous permettraient d'analyser des facteurs complètement différents. Ainsi, nous pourrions voir comment ces facteurs confirment ou infirment nos propos. Par exemple, beaucoup de remarques ont été considérées comme hors du sujet de l'étude. En effet, le peu d'erreurs détectées ne constituait évidemment pas les seules remarques émises par les participants. Cet ensemble d'informations complémentaires apporterait une couche de complexité supplémentaire à notre analyse néanmoins intéressante.

6. REFERENCES

6.1. BIBLIOGRAPHIE

Anastassova M., (2006). L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergente: le cas de la Réalité Augmentée pour la formation à la maintenance automobile. Psychologie. Université René Descartes - Paris V.

Anastassova, M., Burkhardt, J-M., Mégard, C., Ehanno, P. (2007). L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage : une revue. In *Le travail humain 2007/2 (Vol. 70)*, p. 97-125. DOI 10.3917/th.702.0097

Arnaldi B., Guitton P., & Moreau G. (dir) (2018). *Réalité virtuelle et réalité augmentée. Mythes et réalités*, Iste Edition.

Ahlers K., Kramer A., Breen, D., & al. (1995). Distributed Augmented Reality for Collaborative Design Applications in Computer Graphics Forum · August 1995 DOI: 10.1111/j.1467-8659.1995.cgf143_0003.x

Azuma, R.T., (1997). A survey of augmented reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp.355-385.

Baker, L. (2006). Observation: A complex Research Method. *Library trends*, 55 (1), pp. 171-189

Baudoux G., (2019). Analyse des méthodes de travail collaboratif en conception intégrée – Analyse des patterns d'usage des Moyens de conception.

Blavier A., Leclercq P. & Safin S. (2008). Errors in architectural design process: Towards a cognitive model. International Design Conference - DESIGN 2008 Dubrovnik - Croatia.

Blondin, D. (2005). L'observation en situation en milieu primaire : dépasser les contraintes, enrichir la recherche. *Recherches qualitatives, Hors série (2)*, pp. 18-37.

Boustila S., (2016) Conception et évaluation d'un outil de revue de projet architectural en réalité virtuelle : problématique de la conception des distances en environnement virtuel. Université de Strasbourg.

Calixte, X., & Leclercq, P. (2017). Nouvelles pratiques communicationnelles en co-conception synchrone: discussion sur 4 situations d'usage d'espaces de réalité augmentée.

Casarin J., Bechmann, D., & Keller, M. (2017). Un Modèle Unifié de l'Interaction en Environnement 3D

Cubillo, J., Martin, S., Castro, M., & al. (2015). Preparing Augmented Reality Learning Content Should be Easy: UNED ARLE—an Authoring Tool for Augmented Reality Learning Environments.

David, D. (2018). L'accès au BIM pour les petites et moyennes agences d'architecture : méthodologie et interopérabilité. Mémoire de fin d'études, Université de Liège, Liège, Belgique.

Elsen, C. (2011). La médiation par les objets en design industriel, perspectives pour l'ingénierie de conception. PhD Thesis, University of Liège, Belgium.

Elsen, C., Jancart, S., & Stals, A. (2018). La complexité dans la pratique architecturale numérique : le cas des bureaux belges de petite et moyenne taille.

Feki, A., Ben Rajeb, S. (2015). Adaptability of a collaborative design of a situation within an augmented space.

Fleck, S., & Audran, J. (2016). Réalité augmentée et interfaces tangibles, quels liens avec la formation par simulation ? *Recherche et formation*, 82(2), pp 85-90.

Hervy, B., Laroche, F., Kerouanton, J-L., & al. (2014). Augmented historical scale model for museums: from curation to multi-modal promotion. *Laval Virtual VRIC'14*, Laval, France. DOI: 10.1145/2617841.2617843

Kirsh, D. (2010). Thinking with external representations. In *AI & SOCIETY* (Vol. 25, pp. 441-454).

Leclercq, P. (1994). *Environnement de conception architecturale pré-intégrée. Eléments d'une plate-forme d'assistance basée sur une représentation sémantique*. Liège, Belgique : Editions de l'Université de Liège.

Margarita S. & al. (2007). L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage : une revue. In *Le travail humain* 2007/2 (Vol. 70), p. 97-125. DOI 10.3917/th.702.0097

Milgram P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1994). Augmented reality: A class of display on the reality-virtuality *Telemanipulator and Telepresence*. DOI: 10.1117/12.197321

Norman, D.A., (1981). Categorization of action slips. *Psychological Review*. Vol 88. pp 1-15. DOI: 10.1037//0033-295X.88.1.1

Patti, E., Mollame, A., Erba, D., & al. (2017). Combining Building Information Modelling and Ambient Data in Interactive Virtual and Augmented Reality Environments.

Picon, A. (2005). Culture numérique et architecture : Une introduction. *Editions Birkhäuser*. Basel, Suisse.

Portman, M., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computer, Environment and Urban Systems* 54.

Reason, J. (1993). *L'erreur humaine*. Paris : Presses universitaires de France.

Ridel, B., Mellado, N., Reuter, P., & al. (2013). La Lampe torche magique : Une interface tangible pour l'inspection géométrique d'objets en réalité augmentée spatiale. 25^{ème} conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM'13. DOI : 10.1145/2534903.2534906

Safin, S. (2012). Processus d'externalisation graphique dans les activités cognitives complexes : le cas de l'esquisse numérique en conception architecturale individuelle et collective, Thèse, Université de Liège, Liège, Belgique.

Sellen, A.J. (1994). Detection of everyday errors. *Applied Psychology: An International Review*, 43, pp. 475-498.

Safin, S., Leclercq, P., & Blavier, A. (2008). Errors in architectural design process: towards a cognitive model. In M. S. D. Marjanovic, N. Pavkovic & N. Bojcetij (Ed.), *Proceedings of Design 2008: International Design Conference*. Dubrovnik, Croatia.

Savoie-Zajc, L. (2006). Comment peut-on construire un échantillonnage scientifiquement valide ? Dans F. Guillemette, & C. Baribeau, *Recherches qualitatives Collection hors série « Les actes »* (PP.99-111). Montréal : Association pour la recherche qualitative.

Silva, R., Oliveira, J.C., & Giraldi, G. (2003). Introduction to augmented reality.

Stals, A., Jancart, S., & Elsen, C. (2018) La complexité dans la pratique architecturale numérique : le cas des bureaux belges de petite et moyenne taille.

Viet, T. P., Yeon, C. S., Hak W. S., & Ahrina, C. (2009). AR: an application for interior design.

Vivegnis, E. (2017). Construction d'un bac à sable à réalité augmentée pour illustrer certains phénomènes hydrologiques, hydrauliques et hydrogéologiques. Mémoire de fin d'études, Université de Liège, Liège, Belgique.

6.2. WEBOGRAPHIE

Trésor de la langue française informatisé (TLFI). Consulté le 30 décembre 2018 à :
<http://stella.atilf.fr/Dendien/scripts/tlfiv5/visusel.exe?11;s=3960708450;r=1;nat=;sol=0>
;

Développement d'ARKit (2019) Consulté le 2 Août 2019 à :
<https://developer.apple.com/augmented-reality/>

Logiciel Augment, consulté le 2 Août 2019 à : <https://www.augment.com/about-us/>

Encyclopédie Universalis, consulté le 30 décembre 2018 à :
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/outil/>

7. ANNEXES

7.1. ENONCE DE LA MISE EN SITUATION 2D

MISE EN SITUATION

En tant qu'expert en conception, vous travaillez régulièrement avec différentes agences d'architecture. Votre rôle est de participer à des brainstormings, d'assister la conception d'avant-projets, de faire des revues de projets, et d'officier en tant que jury lors de concours.

Un nouveau bureau d'architectes canadiens souhaite faire appel à vos services. Ils souhaitent que vous leur donniez un avis consultatif sur un des avant-projets qu'ils sont en train de concevoir. Étant donné la distance vous séparant, il n'est pas possible de vous rencontrer physiquement. C'est pourquoi ils vous demandent d'analyser les documents envoyés et de leur rendre un avis en les annotant.

PRÉSENTATION DU PROJET

Le projet consiste en une maison unifamiliale implantée dans un terrain en pente dans la périphérie de la ville de Québec, au Canada. Le quartier est composé principalement de résidences 4 façades. Le programme composant la maison est constitué de : un garage, un hall d'entrée avec w.c. séparé, un bureau, une grande pièce de vie regroupant la cuisine, le salon et la salle à manger, deux chambres, ainsi qu'une salle de bain et des locaux techniques.

CONSIGNES

- Analysez l'avant-projet, mentionnez les améliorations possibles et détectez d'éventuelle(s) erreur(s).
- Vous avez devant vous un plan ainsi que des outils de dessin, vous ne pouvez utiliser que ce qui se trouve sur cette table.
- Pour faire vos remarques, annotez simplement le document.
- À la fin de la lecture de cet énoncé, vous pouvez poser toutes les questions que vous souhaitez. Ensuite, vous ne pourrez plus interagir avec l'observateur jusqu'à la fin de l'expérience.

7.2. ENONCE DE LA MISE EN SITUATION RA

MISE EN SITUATION

En tant qu'expert en conception, vous travaillez régulièrement avec différentes agences d'architecture. Votre rôle est de participer à des brainstormings, d'assister la conception d'avant-projets, de faire des revues de projets, et d'officier en tant que jury lors de concours.

Un nouveau bureau d'architectes canadiens souhaite faire appel à vos services. Ils souhaitent que vous leur donniez un avis consultatif sur un des avant-projets qu'ils sont en train de concevoir. Étant donné la distance vous séparant, il n'est pas possible de vous rencontrer physiquement. C'est pourquoi il vous demande d'analyser les documents envoyés et de leur retourner par la suite.

Ce même bureau tente d'introduire de nouvelles méthodes de revues de projets et teste actuellement une plateforme de réalité augmentée. Dans ce cadre, il vous demande d'analyser un projet au moyen de cette technologie.

Pour ce faire, le bureau vous a mis à disposition un iPad ainsi qu'un socle sur lequel le projet apparaîtra virtuellement. Après avoir pris connaissance de l'énoncé, vous participerez à une brève formation.

PRÉSENTATION DU PROJET

Le projet consiste en une maison unifamiliale implantée dans un terrain en pente dans la périphérie de la ville de Québec, au Canada. Le quartier est composé principalement de résidences 4 façades. Le programme composant la maison est constitué de : un garage, un hall d'entrée avec w.c. séparé, un bureau, une grande pièce de vie regroupant la cuisine, le salon et la salle à manger, deux chambres, ainsi qu'une salle de bain et des locaux techniques.

CONSIGNES

- Analysez l'avant-projet, mentionnez les améliorations possibles et détectez d'éventuelle(s) erreur(s).
- Pour cette revue, vous ne pouvez utiliser que l'outil fourni.
- Pour faire vos remarques, utilisez la fonction photo de l'application en enregistrant les zones qui vous semblent problématiques.
- À la fin de la lecture de cet énoncé, vous pouvez poser toutes les questions que vous souhaitez. Ensuite, vous ne pourrez plus interagir avec l'observateur jusqu'à la fin de l'expérience excepté en cas de problème technique avec la tablette.

7.3. ENONCE DE LA MISE EN SITUATION MIXTE

MISE EN SITUATION

En tant qu'expert en conception, vous travaillez régulièrement avec différentes agences d'architecture. Votre rôle est de participer à des brainstormings, d'assister la conception d'avant-projets, de faire des revues de projets, et d'officier en tant que jury lors de concours.

Un nouveau bureau d'architectes canadiens souhaite faire appel à vos services. Ils souhaitent que vous leur donniez un avis consultatif sur un des avant-projets qu'ils sont en train de concevoir. Étant donné la distance vous séparant, il n'est pas possible de vous rencontrer physiquement. C'est pourquoi il vous demande d'analyser les documents envoyés et de leur retourner par la suite.

Ce même bureau tente d'introduire de nouvelles méthodes de revues de projets et teste actuellement une plateforme de réalité augmentée. Dans ce cadre, il vous demande d'analyser un projet au moyen de cette technologie.

Pour ce faire, le bureau vous a mis à disposition un iPad ainsi qu'un socle sur lequel le projet apparaîtra virtuellement. Après avoir pris connaissance de l'énoncé, vous participerez à une brève formation.

PRÉSENTATION DU PROJET

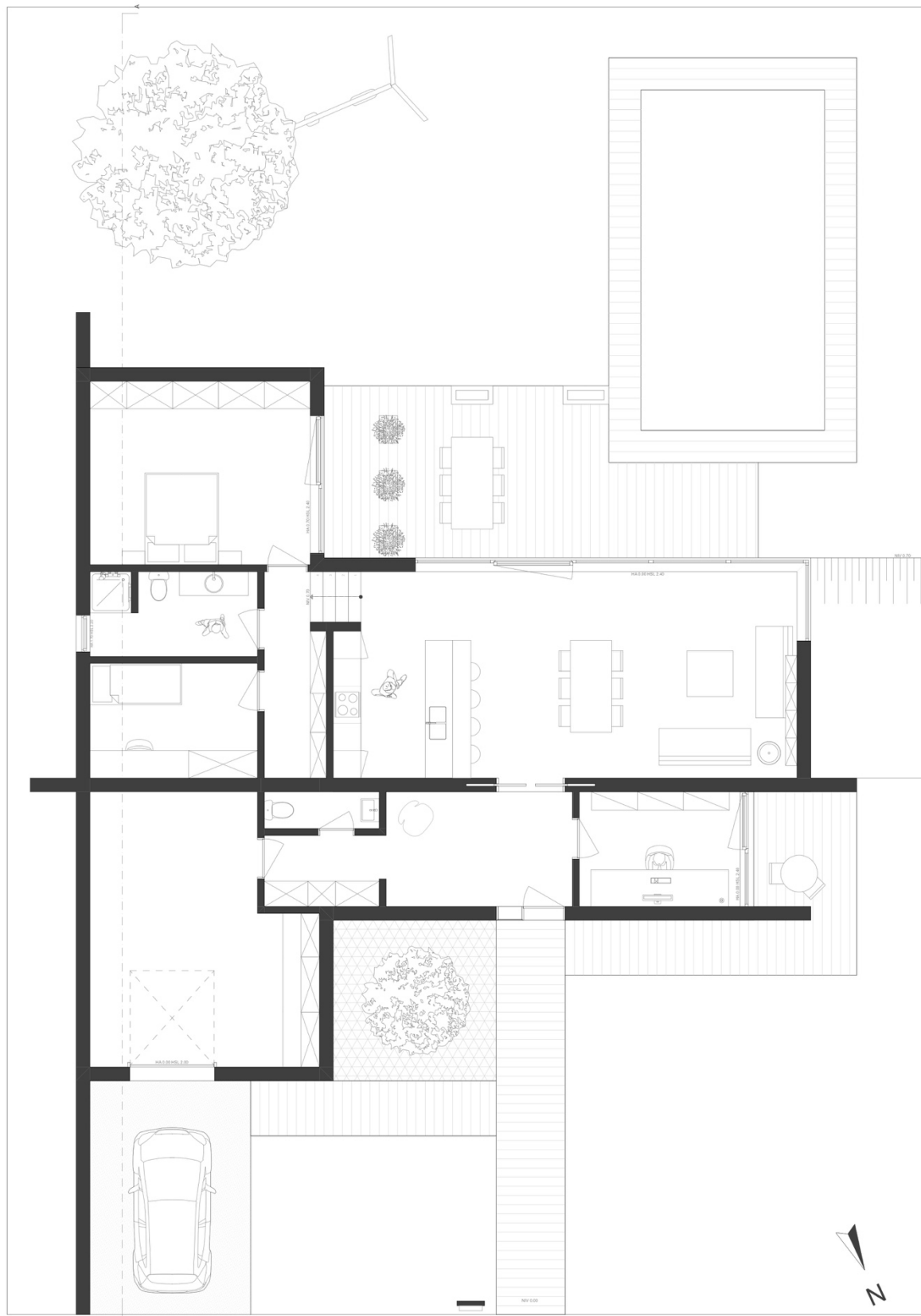
Le projet consiste en une maison unifamiliale implantée dans un terrain en pente dans la périphérie de la ville de Québec, au Canada. Le quartier est composé principalement de résidences 4 façades. Le programme composant la maison est constitué de : un garage, un hall d'entrée avec w.c. séparé, un bureau, une grande pièce de vie regroupant la cuisine, le salon et la salle à manger, deux chambres, ainsi qu'une salle de bain et des locaux techniques.

CONSIGNES

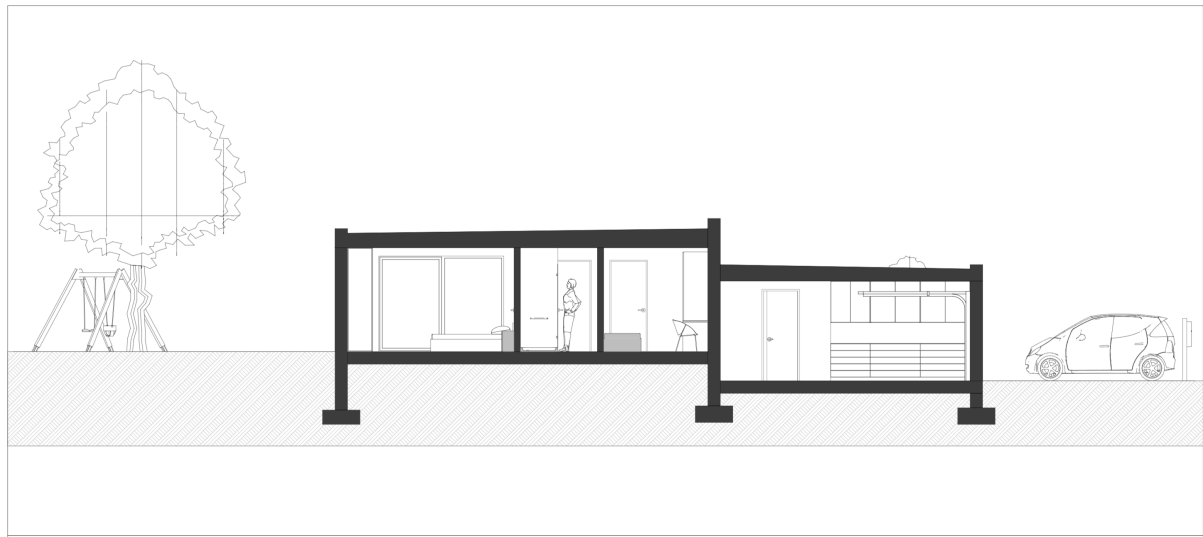
- Analysez l'avant-projet, mentionnez les améliorations possibles et détectez d'éventuelle(s) erreur(s).
- Pour cette revue, vous pouvez utiliser la maquette virtuelle ainsi que le plan du bâtiment.
- Pour faire vos remarques, utilisez la fonction photo de l'application en enregistrant les zones qui vous semblent problématiques ou réalisez de simples annotations sur le plan.

- À la fin de la lecture de cet énoncé, vous pouvez poser toutes les questions que vous souhaitez. Ensuite, vous ne pourrez plus interagir avec l'observateur jusqu'à la fin de l'expérience excepté en cas de problème technique avec la tablette.

7.4. PLAN DU PROJET



7.5. COUPE DU PROJET



7.6. EXEMPLE DE CAPTURES DE LA MAQUETTE NUMERIQUE EN RA



7.7. GRILLE DE PRISE DE NOTES

EXPERIENCE REVUE DE PROJET - GRILLE D'ANALYSE

N° Sujet

Sexe :

Age :

Date

Type de revue

h début

h fin

2D

RA

RA + 2D

Temps	Description de l'interaction	Focus (RDC, R+1, coupe, maquette 3D)	Action (Mesure, dessine, réfléchit, se balade dans le modèle)	Détection d'erreur (oui ou non)	Type d'erreur détectée (structurale, aménagement, topographie, ...)	Commentaires
00:00						
00:30						
01:00						
01:30						
02:00						
02:30						
03:00						
03:30						

7.8. GRILLE DE CODAGE

[illegible]

7.9. ACCORD DE CONFIDENTIALITE

ACCORD D'UTILISATION DE PRODUCTION ET DE DROIT D'IMAGE

Je soussigné(e).....,

participant(e) àdu à

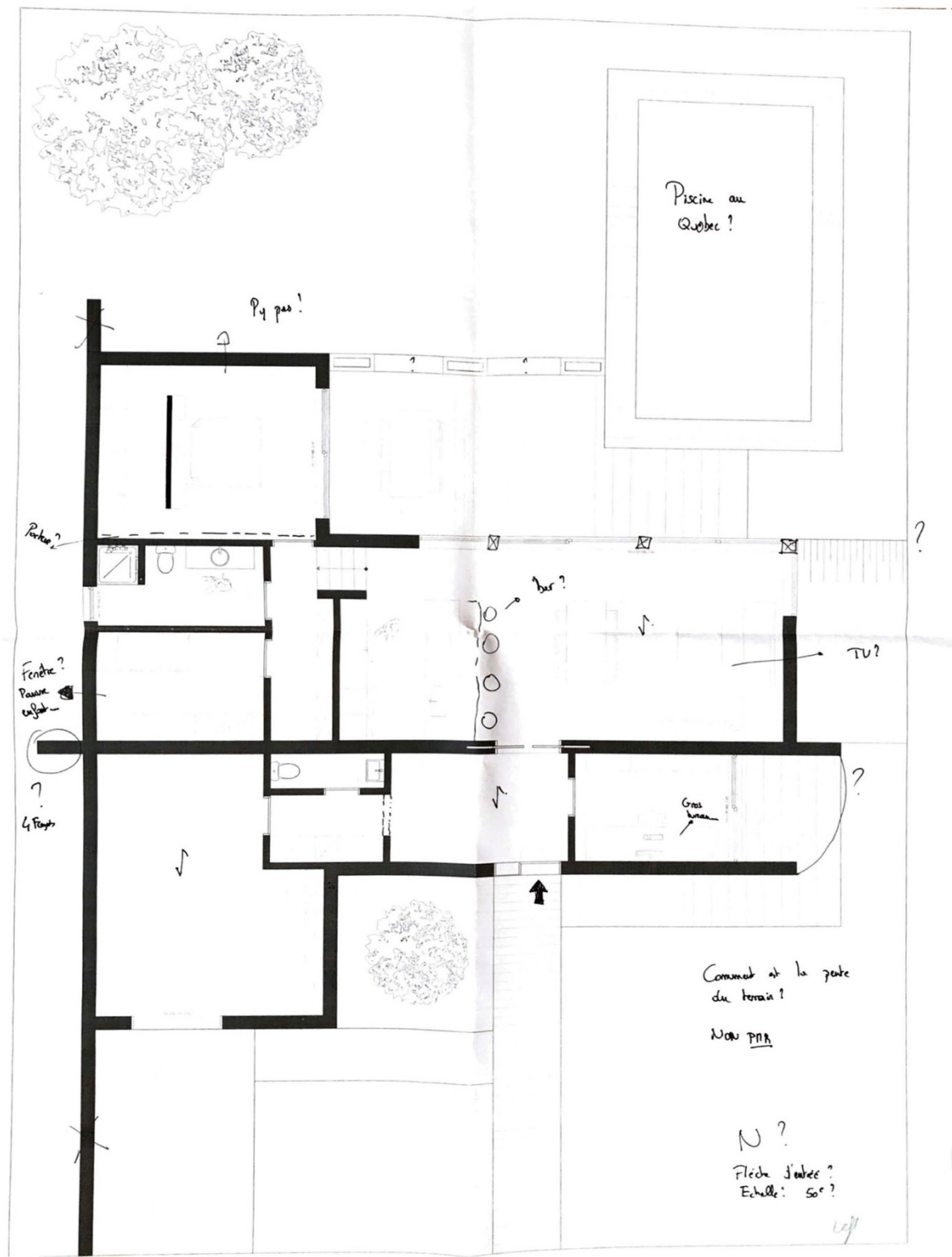
autorise les organisateurs, ainsi que les chercheurs associés et leurs collaborateurs scientifiques, à utiliser librement, à des fins de recherche et d'enseignement, tout contenu, toute image fixe ou animée me représentant, ainsi que toutes mes productions graphiques et textuelles réalisées dans le cadre de cette activité

Fait à, le

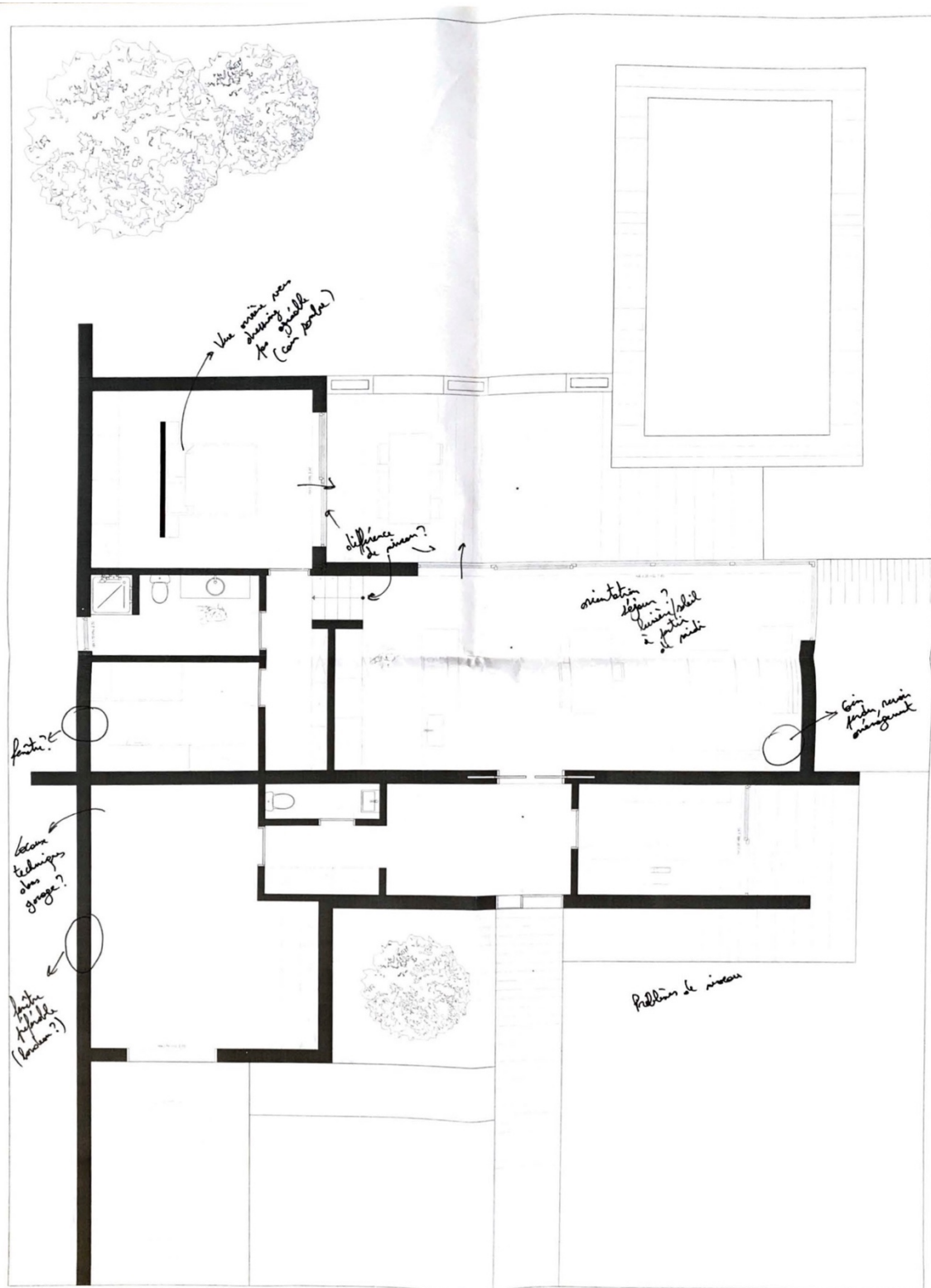
Signature

7.10. SCAN DES PLANS DES PARTICIPANTS

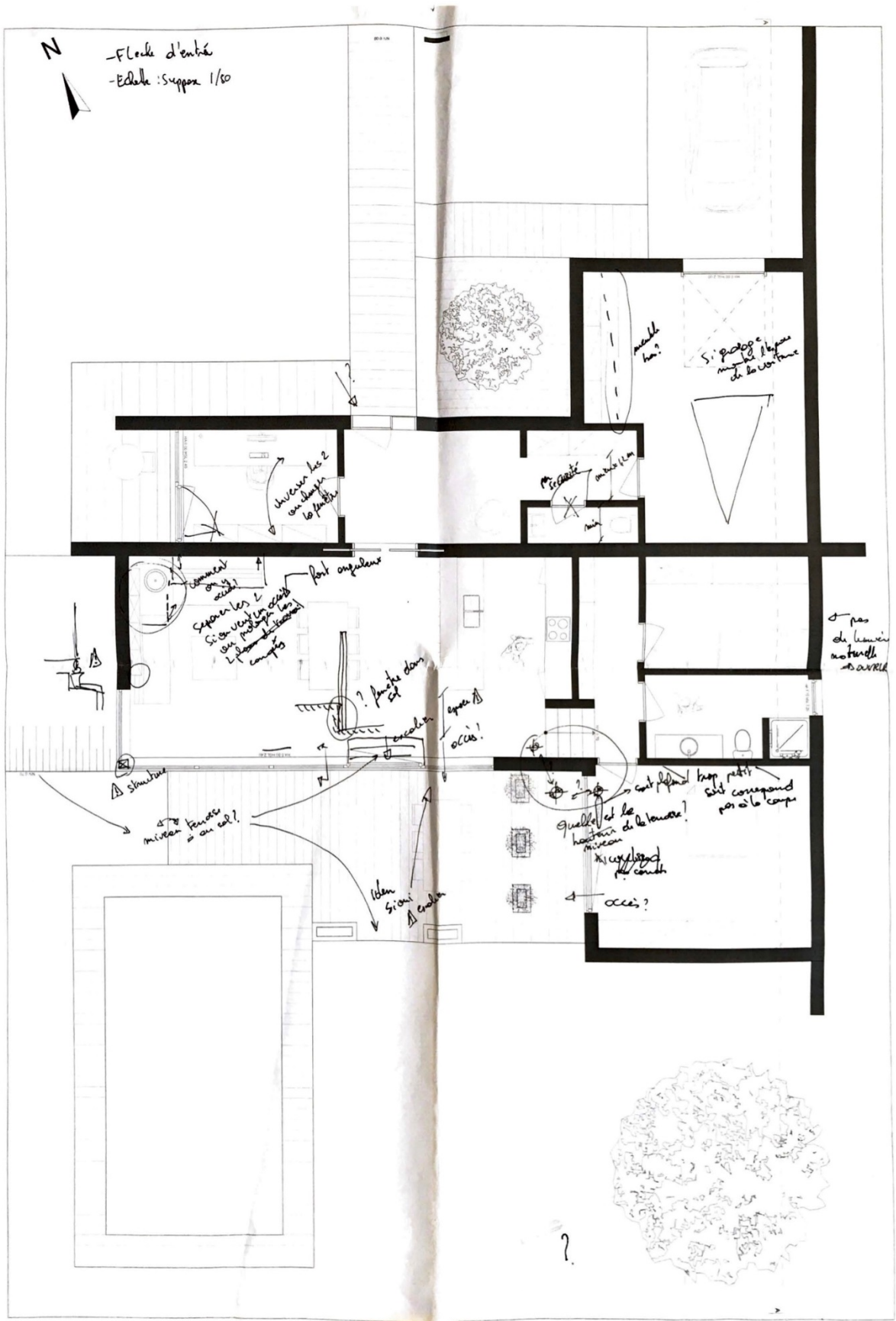
PARTICIPANT 1



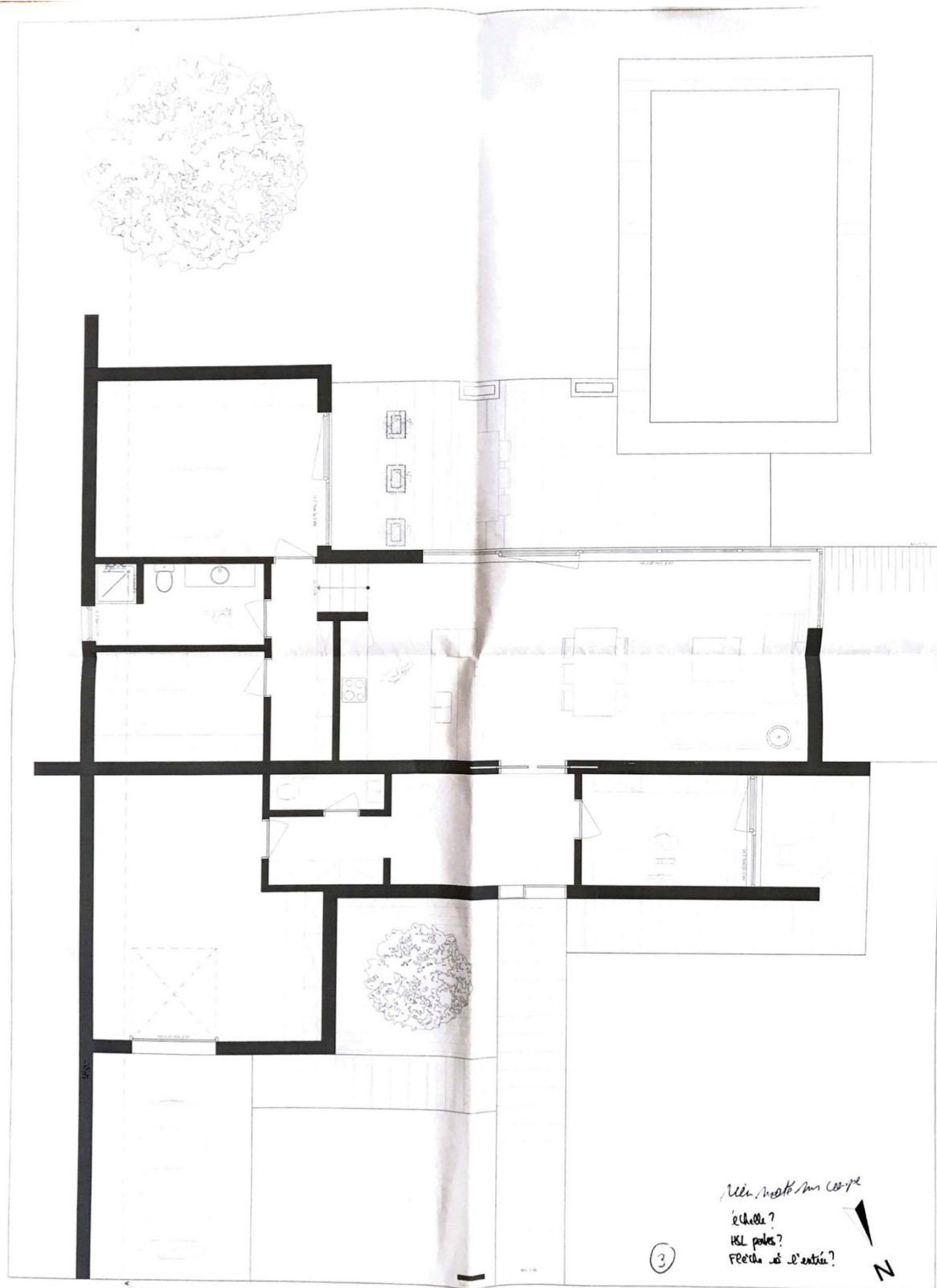
PARTICIPANT 4



PARTICIPANT 7



PARTICIPANT 9

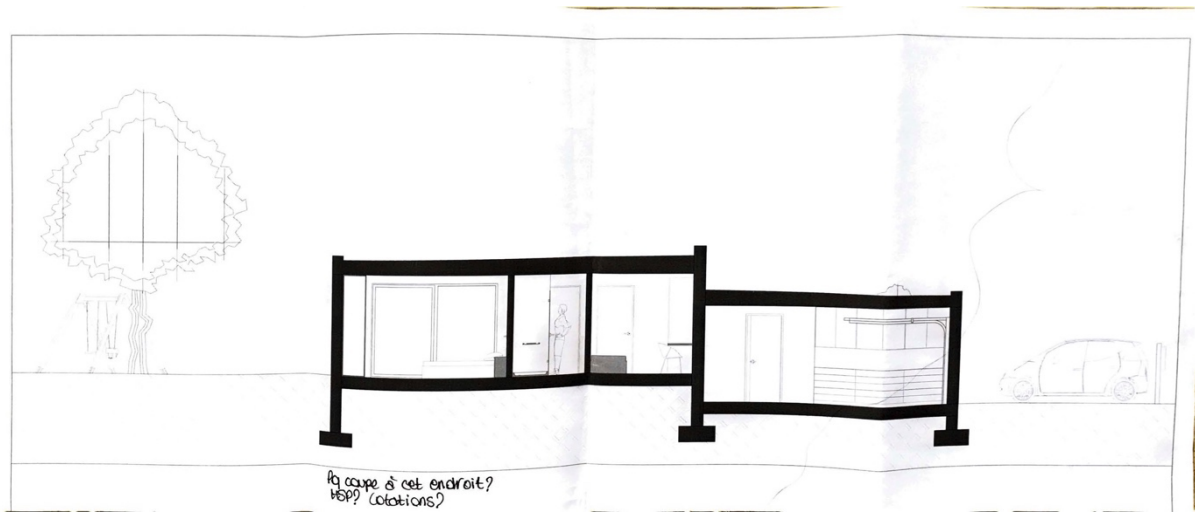


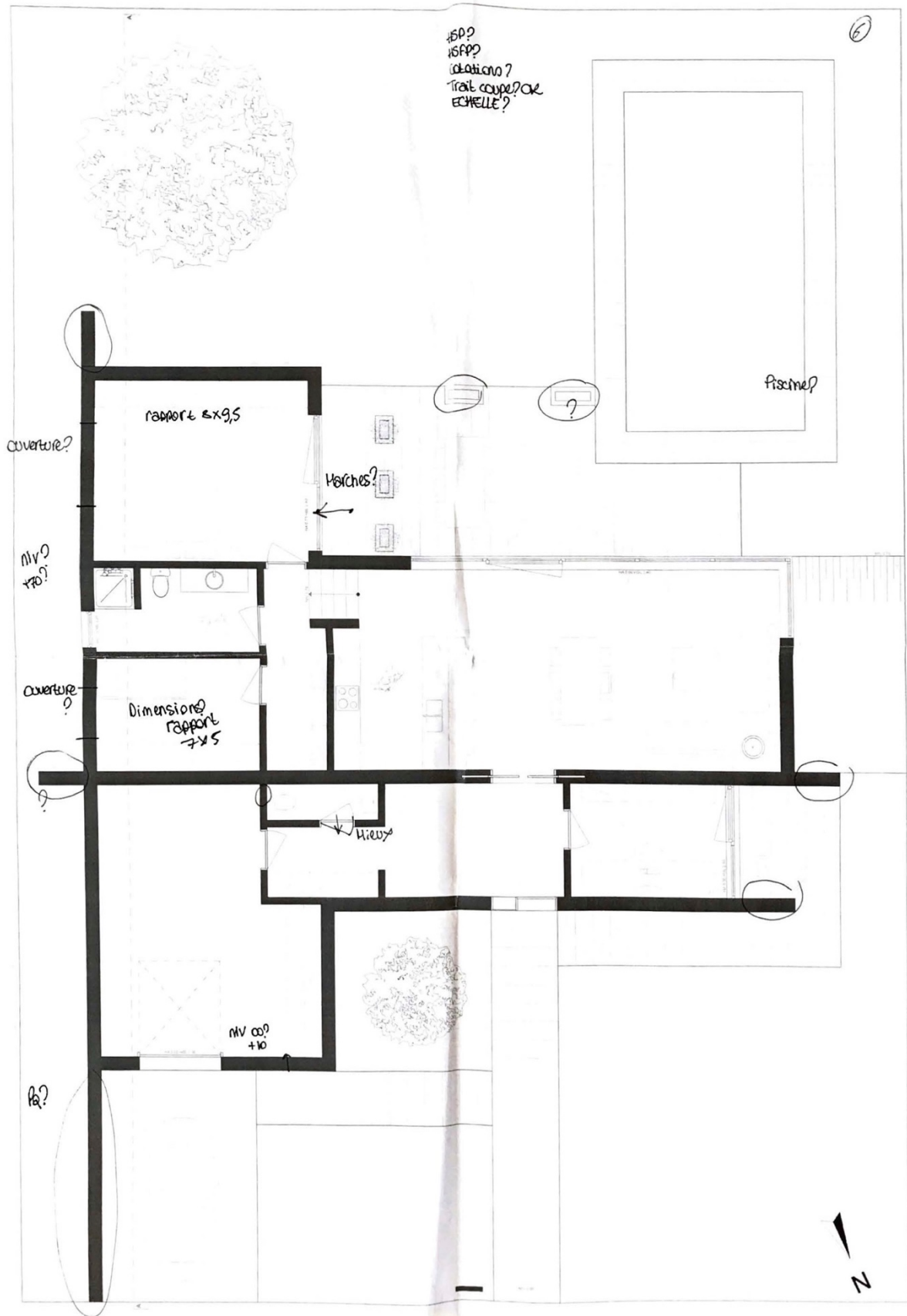
A hand-drawn architectural floor plan of a house, oriented with North (N) at the top. The plan is divided into several rooms and areas, with various annotations and dimensions.

- Top Left:** A large rectangular area, possibly a garden or patio, with a small square structure inside.
- Top Center:** A room labeled "luminière ouest!" (west light!).
- Top Right:** A room labeled "vitrée?" (glass?).
- Middle Left:** A room labeled "cuisine" (kitchen) with a small square structure inside.
- Middle Center:** A room labeled "cuisine" (kitchen) with a small square structure inside.
- Middle Right:** A room labeled "vitrée?" (glass?).
- Bottom Left:** A large rectangular area, possibly a garden or patio, with a small square structure inside.
- Bottom Center:** A room labeled "luminière ouest!" (west light!).
- Bottom Right:** A room labeled "vitrée?" (glass?).

Other annotations include "cuisine", "vitrée?", "luminière ouest!", "cuisine", "vitrée?", "luminière ouest!", "cuisine", "vitrée?". Dimensions are given in meters (m) and centimeters (cm). A scale bar is provided at the bottom right.

PARTICIPANT 13





PARTICIPANT 15

