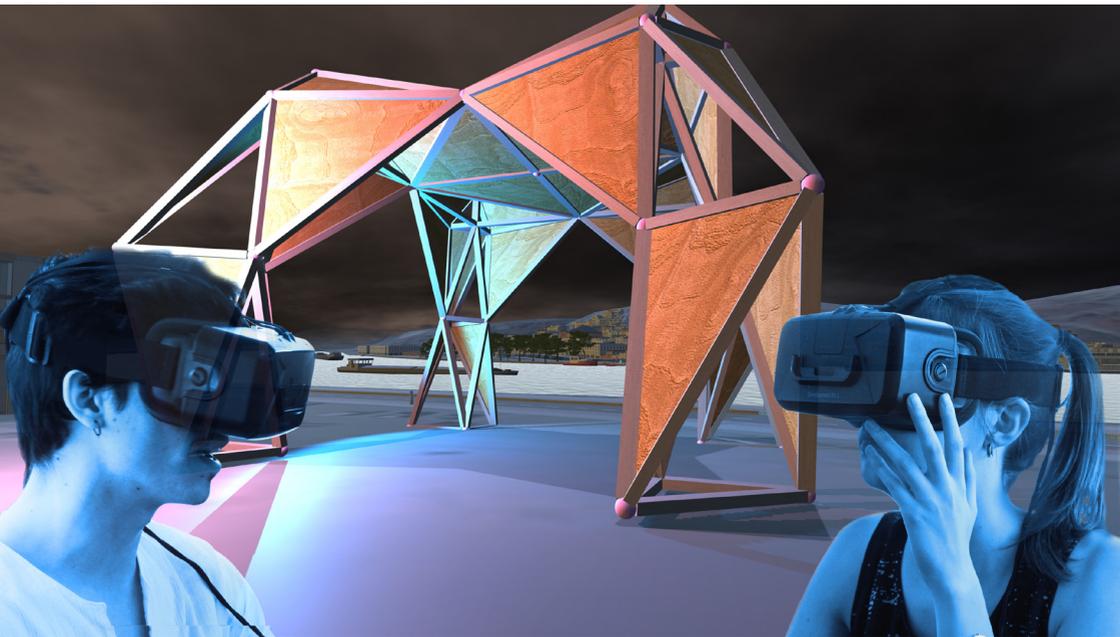


Digital Knowledge
ENSAPM 2015 - 2016

Oswald PFEIFFER
Mathieu VENOT

DixieVR

IMMERSIVE MULTI-USER SIMULATION FOR
ARCHITECTURAL CONCEPTION



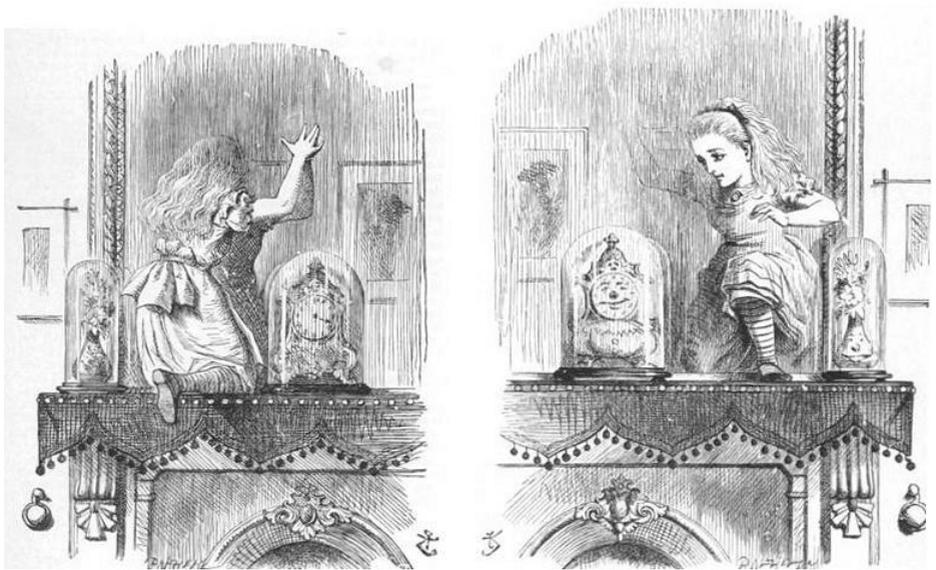
Virtual Reality
Game Mechanics
Sandbox
Simulation
Immersion
Virtuality
Hyperreality
Intuitive Design
Intelligence Amplification
Collaborative Design
Collaborative Conception
Spacialized Data
Big Data
Interoperability
Head Mounted Display
Perception
Interaction
Cyberspace

“How do you think Dixie got himself flatlined, huh? Trying to buzz an AI. Great...” “Go on,” she said, “the two of you are supposed to be dynamite, right?”

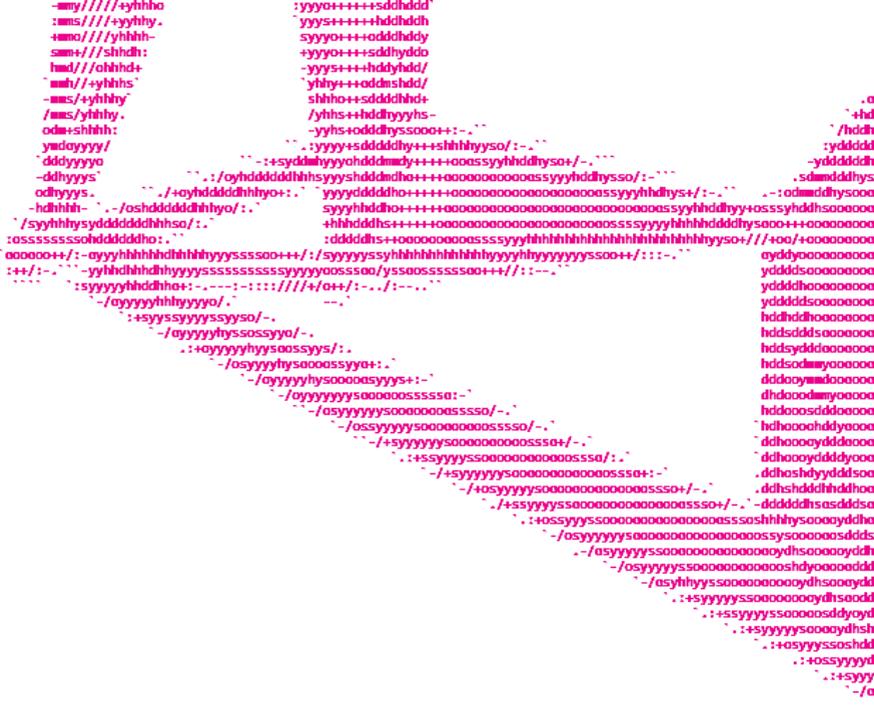
GIBSON William, *Neuromancer*, New York, ACE, 1984

SOMMAIRE

I.		
DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR		
<i>Et ce que les architectes y trouvèrent.....</i>		6
II.		
DIXIEVR		
<i>Concevoir avec la Simulation Immersive Collaborative.....</i>		22
A. Outils conceptuels.....		24
B. Ressources physiques et numériques.....		30
C. Interface et mécaniques de jeu.....		38
D. Simulation d'un environnement existant.....		54
E. Interopérabilité.....		58
F. Production.....		64
G. Conclusion, potentiel et perspectives.....		74
III.		
LA MORT DE L'HOLOGRAMME		
<i>Acceptation et Accélération.....</i>		82
IV.		
BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE.....		90



Alice passant de l'autre côté du miroir
Illustration originale de "Through the Looking Glass", Lewis Carroll (1871)



I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

Et ce que les architectes y trouvent

I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

Ce projet de recherche s'inscrit dans la continuité de ceux menés depuis le début des années 60 sur les interfaces homme/machine immersives, ceux-ci dérivant eux-mêmes de la pensée cybernétique.

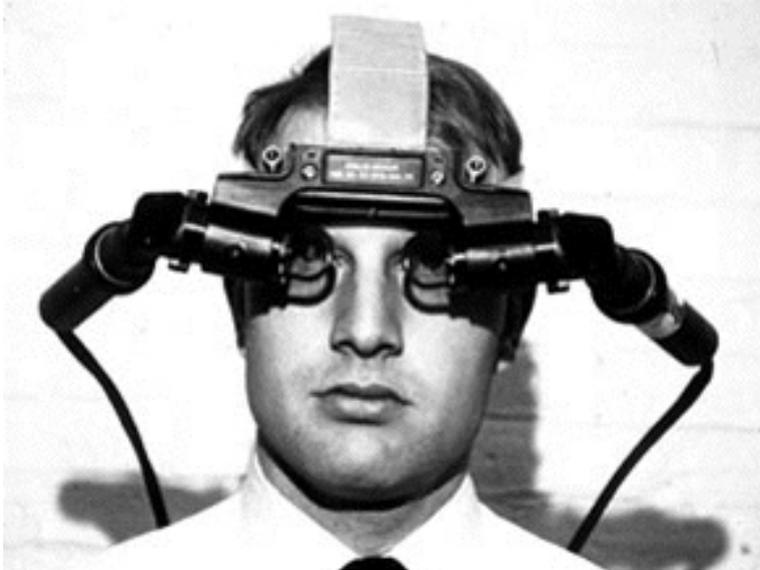
Depuis le premier prototype de visiocasque réalisé par Ivan Sutherland en 1968¹, de nombreux chercheurs à la fois du domaine public et privé tentent d'effacer au mieux la frontière conceptuelle qui existe entre l'espace physique et le *Cyberespace*² au moyen de dispositifs immersifs. Ce domaine de recherche est aujourd'hui plus connu sous le nom de Réalité Virtuelle³. Les dispositifs auxquels nous faisons référence permettent de reconfigurer les sens d'un sujet afin de plonger plus ou moins intensément son corps dans le *Cyberespace*, cet environnement d'informations pur, ce «pays des merveilles mathématique»⁴, où la perception humaine peut interagir avec une simulation numérique de façon naturelle et immersive. Longtemps restée inabordable et insatisfaisante, la réalité virtuelle est aujourd'hui en train de vivre un tournant majeur grâce à la convergence d'un

1 *Incredible Helmet* ou *Sword of Damocles*, construit au sein de l'Université d'Harvard puis de l'Université de l'Utah

2 Le terme *Cyberespace* a été introduit par William Gibson dans *Neuromancer*, cf GIBSON William, *Neuromancer*, New York, Ace, 1984

3 Le terme original *Virtual Reality* a été introduit par Jaron Lanier en 1989

4 SUTHERLAND Ivan, *The Ultimate Display*, Proceedings of the IFIP (International Information Security Conference) Congress, 1965



Ivan Sutherland - Incredible Helmet (1968)



Scott Fischer - VR research for NASA (1985)

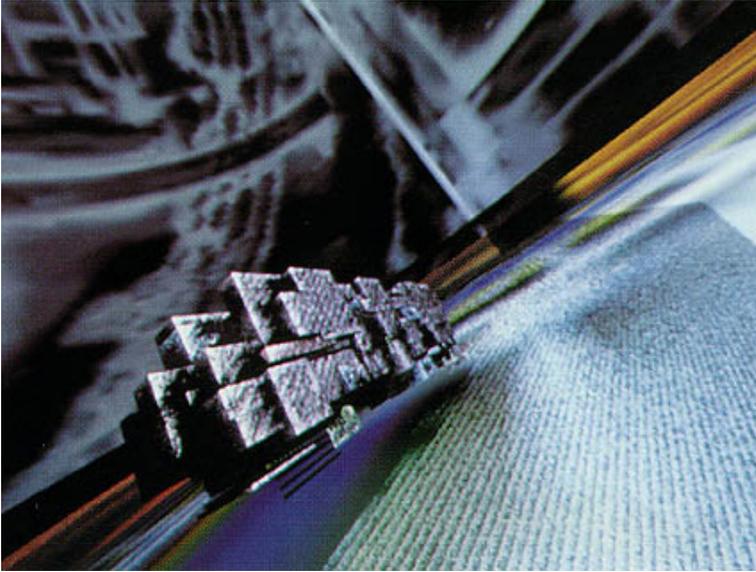
I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

ensemble de facteurs technologiques et économiques comprenant entre autres l'accroissement exponentiel des capacités de calcul des ordinateurs.

Au début des années 90, l'accès aux premiers dispositifs efficaces de réalité virtuelle a été rendu possible, créant une certaine effervescence autour de la question du Cyberspace. L'architecture se trouva très concernée par cet média, et plusieurs figures majeures commencèrent alors à s'y intéresser de près : citons Marcos Novak, qui théorisa alors les concepts d'*architecture liquide*, de *trans-architecture* et de *trans-architecte*⁵, Lars Spuybroek (NOX), qui explora l'*Hypersurface*, élément architectural intégrant des caractéristiques technologiques et interactives, ou encore Kas Oosterhuis, menant toujours aujourd'hui des recherches sur l'interaction, l'immersion et le design collaboratif au sein du studio Hyperbody de l'université de Delft.

Cependant, la technologie manquait à cet époque encore de maturité, et la réalité virtuelle fut rapidement oubliée par le public. Du côté de l'architecture, la recherche liée au numérique entreprit un tournant pouvant être qualifié de « structurel » : la production s'orienta alors vers la

5 « le cyberspace est architecture ; le cyberspace possède une architecture ; et le cyberspace contient de l'architecture. » NOVAK Marcos, *Liquid Architectures in Cyberspace*, in BENEDIKT Michael (dir.), *Cyberspace. First steps*, Cambridge, The MIT Press, 1992, p.226



Marcos Novak - Liquid Architecture in Cyberspace (1991)



Studio Hyperbody - Protospace

I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

matérialité, les sciences de l'ingénieur, les méthodes de fabrication et la production d'architectures non standard. Il semble pourtant paradoxal de constater que le Cyberspace ait été déserté sous le motif qu'il n'était pas assez rattaché au réel puisque, finalement, beaucoup de projets de recherches centrés uniquement sur la matière l'idéalisent encore aujourd'hui au point de la traiter comme une finalité en soi. Peu importe si l'objet produit n'est pas fonctionnel ou viable vis-à-vis de l'industrie de la construction, sa seule réalisation serait censée lui donner une valeur. Et quelle serait alors cette valeur ? Celle d'une étape en plus dans une course à l'innovation ? Ce phénomène, sans doute lié à l'accélération des systèmes de communication et d'échange des savoirs, est particulièrement visible dans les milieux artistiques où l'on ne cherche plus forcément à produire une œuvre proposant une véritable densité ou une grande qualité d'exécution mais plutôt à créer de l'originalité et de l'insolite. Il serait par ailleurs possible d'affirmer que le « réel » n'est pas plus appréhendable par la matière que par le virtuel. Nous pourrions même soutenir que l'effet est inverse puisque le virtuel est, d'un point de vue philosophique, à considérer comme un puissant moteur de réalités. Ce qui donnerait à une production un caractère « réel » serait alors plutôt sa capacité à prendre part au système complexe de relations caractérisant le savoir humain ? Kas Oosterhuis dit à ce propos dans une interview pour Game Set and Match : « Tel que je le



Achim Menges - Research Pavilion (2013)



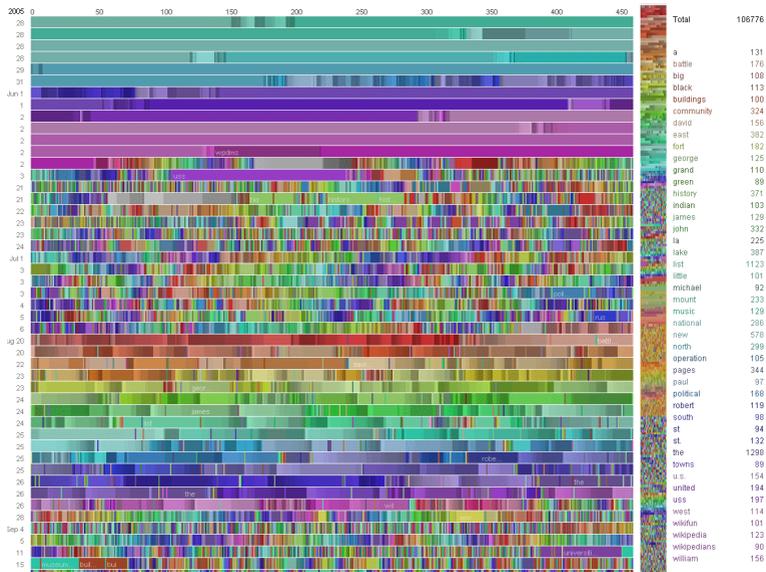
Plexe-e - Projet de Master à the Bartlett School of Architecture (2015)

I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

vois, la réalité virtuelle est plus réelle que ce que nous comprenons habituellement par réalité. Nous savons tout de la moindre particule de réalité virtuelle. Nous savons exactement comment le matériel électronique fonctionne et comment le logiciel traverse ses circuits. La réalité virtuelle est plus une sorte d'hyperréalité, et dans notre travail, nous cherchons à faire collaborer la réalité et cette hyperréalité en temps réel. »⁶. L'essence du Cyberespace ne serait donc pas moins réelle que la matière puisqu'elle possède un niveau d'abstraction supérieur qui la positionne directement au niveau de l'infosphère.

En dehors de ce débat épineux sur l'état de la recherche en architecture computationnelle aujourd'hui, nous constatons que le cyberespace n'a pas pour autant cessé de se propager dans l'ensemble des sphères de la société, en grande partie par le biais du développement exponentiel du web. Les technologies de réalité virtuelle/réalité augmentée étant aujourd'hui viables et sur le point d'envahir massivement nos quotidiens (il suffit de suivre l'actualité et d'observer les investissements économiques colossaux qui sont soulevés par ces technologies pour comprendre qu'un changement radical est en train de

6 OOSTERHUIS Kas, *Yes we build spaceships*, in HUBERS J.C., VAN VEEN Misja, KIEVID Chris (dir.), *Game Set and Match I*. Proceedings of the conference GSM real-time interactive architecture, Delft, Delft University of Technology Faculty of Architecture, 2001, p.9



Visualisation du Big Data de Wikipedia



Campagne publicitaire de Magic Leap, start-up financée par Google promettant de faire sortir internet des écrans

I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

se mettre en place depuis 2012, date de lancement de l'Oculus Rift⁷), il est urgent de faire ré-émerger les questions soulevées il y a une vingtaine d'années à propos de la spatialité des espaces virtuels en considérant les nouveaux facteurs qui viennent nourrir ou modifier ces interrogations.

Malgré le potentiel considérable que possèdent les simulations immersives pour l'architecture (perception de l'espace à échelle 1/1, interaction directe, communication, éducation...), nous constatons que leur principal rôle se résume généralement à la visite virtuelle d'une modélisation 3D d'un bâtiment déjà conçu. Depuis le premier programme de ce type, le système WALKTHROUGH datant des années 80, jusqu'aux dernières solutions exposées à BATIMAT en 2015, il semblerait effectivement qu'aucune réflexion nouvelle sur cette technologie n'ait été formée.

Nous assistons pourtant avec l'émergence du web

7 En 2012 une campagne de financement participatif est lancée par Palmer Luckey, fondateur de la société Oculus, dans le but de récolter \$250.000 pour développer un casque de réalité virtuelle, le Rift. Oculus reçoit \$2.500.000 au bout d'un mois seulement, soit dix fois le montant attendu initialement. Quelques mois plus tard, Facebook rachète la société pour 2 milliards de dollars. 175 000 kits développeurs ont été vendus depuis. Le 8 janvier 2016, Oculus met en prévente une première version commerciale du casque en limitant la vente à un casque par acheteur, le stock est écoulé en 14 minutes.



Oculus Rift, Developer Kit 1 (2012)



Visite Virtuelle - Batimat (2015)

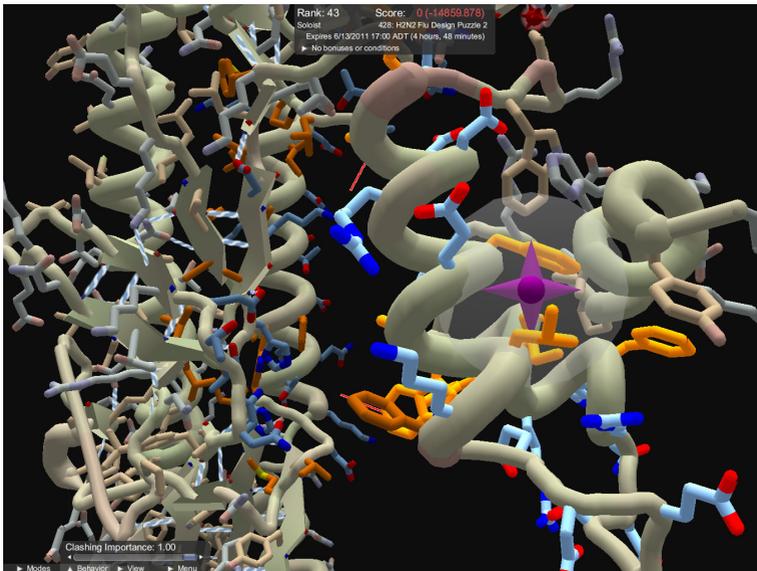
I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

collaboratif à la concrétisation d'une certaine vision de l'intelligence collective qui a su être mise à profit notamment par le biais d'applications basées sur un ensemble de mécaniques issues du jeu vidéo, en particulier du serious game et sandbox game, où le but n'est plus de gagner mais de générer des interactions, encourageant la production de savoir ou la créativité. Kas Oosterhuis explore déjà la question du jeu dans son studio de recherche Hyperbody depuis plusieurs années, les travaux menés par Jose Sanchez au sein de Plethora Project vont également dans ce sens. Nous pensons qu'il serait aujourd'hui judicieux de coupler ce principe à celui de la simulation immersive afin de permettre à différents acteurs, architectes ou non, de concevoir collectivement des espaces en utilisant principalement leur intuition décisive, puisque l'architecture concerne avant tout la production d'espaces, et qu'un espace ne peut être apprécié qu'une fois que notre corps est capable d'en saisir toute la densité en y étant *présent*.

Parallèlement, en prenant simplement en compte l'exemple des communautés en ligne, nous pouvons nous demander ce qu'il adviendra lorsque les échanges ne se feront plus à travers un simple écran mais dans un espace virtuel où le corps de l'utilisateur sera immergé. Pourquoi l'architecte ne serait pas celui à qui reviendrait la tâche de produire ces espaces virtuels



Jose Sanchez - Block Hood (2015)



Départements d'informatique et de biochimie de l'Université de Washington- FoldIt (2008) "Solve Puzzles for Science"

I. DE L'AUTRE CÔTÉ DU MIROIR

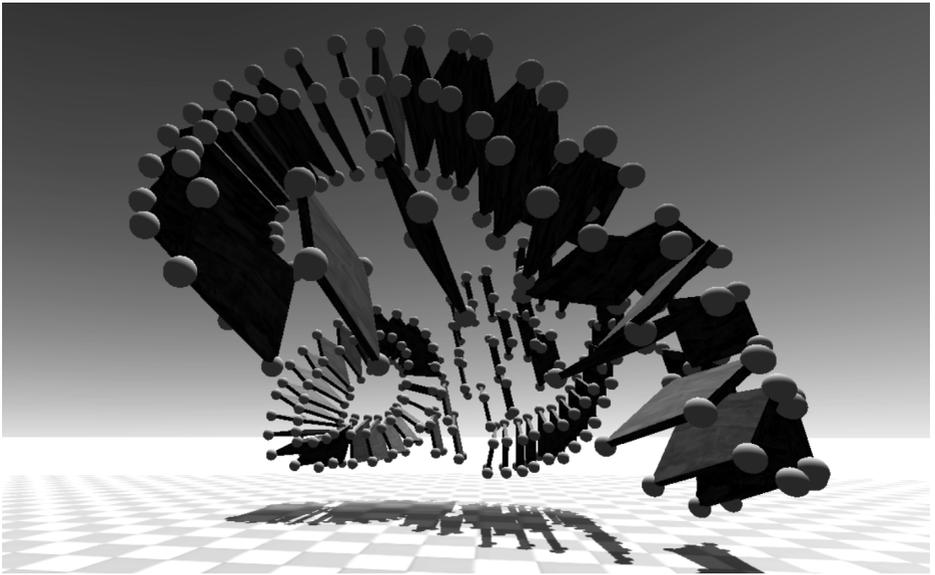
aux contraintes différentes des espaces physiques qu'il produisait jusqu'alors ? Rappelons que ces espaces bien que d'une nature différentes sont tout aussi réels que les espaces physiques et soulèvent des enjeux sociaux et économiques tout aussi importants. Peut être est-ce l'occasion de retrouver une liberté de création qui se perd peu à peu avec le resserrement des normes et autres contraintes ultra restrictives auxquelles l'architecte est soumis, poussant progressivement son rôle de concepteur d'espace vers celui de dessinateur technique ou de conseiller artistique.



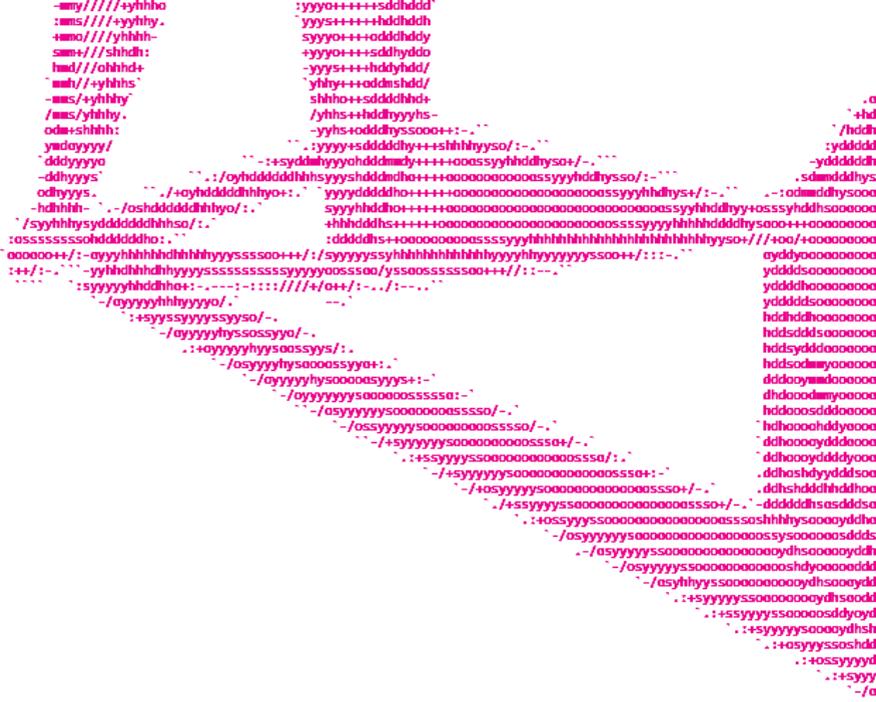
Virtual Dream Center - Projet de musée virtuel (2016)



CONVRGE - "Hang out with friends in virtual reality" (2015)



Forme abstraite générée dans DixieVR



II. DIXIEVR

Concevoir avec la Simulation Immersive Collaborative

II. DIXIEVR

A. Outils Conceptuels

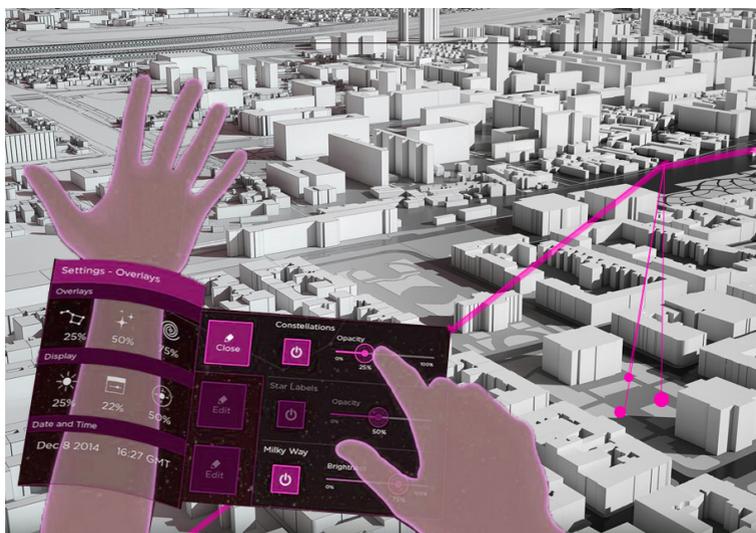
L'objectif principal de cette recherche est de questionner la pertinence de l'utilisation en architecture de la réalité virtuelle en tant que média.

En effet, comment exploiter différemment le potentiel offert par cette technologie, c'est à dire en s'écartant du schéma classique de la visite virtuelle ?

Nos premières réflexions nous ont permis d'identifier plusieurs concepts clefs à intégrer dans notre démarche. D'une part se trouvent les deux piliers de la réalité virtuelle : perception et interaction ; perception par le corps d'un espace simulé à échelle réelle, sensation d'être présent dans la scène et interaction des utilisateurs avec l'environnement virtuel.

D'autre part se profile le principe d'interaction des utilisateurs entre eux, ou le principe de collaboration et de travail en réseau sur un modèle partagé : absolument essentiel depuis la naissance du web et de plus en plus présent dans le champs de l'architecture avec les progrès du BIM (Building Information Modeling).

Ces aspirations se sont traduites par le développement d'un logiciel de simulation multi-utilisateurs permettant de concevoir un projet architectural en immersion : DixieVR.



*Premières intentions pour le développement de DixieVR
(Photomontage)*



*Premières intentions pour le développement de DixieVR
Design collaboratif en immersion, une forme de “démocratie
directe” comme l’entend Kas Oosterhuis dans Game Set and
Match (Photomontage)*

II. DIXIEVR

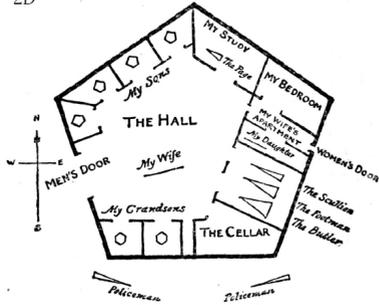
A. Outils Conceptuels

Mais comment exprimer la différence fondamentale qui existe entre regarder un écran et porter un casque de réalité virtuelle ? Cette différence est finalement la même qui pourrait se trouver entre le fait de regarder le monde à travers une fenêtre et être dans le monde.

La barrière se dressant traditionnellement entre l'espace du modèle virtuel et l'espace physique où se trouve l'architecte est ainsi atomisée. Les traditionnelles questions d'échelle, de projection et de représentation, qui sont aussi présentes sur papier que sur écran, prennent une toute autre tournure puisque :

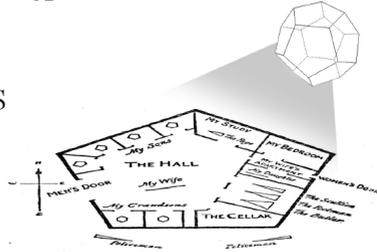
- L'environnement observé apparaît à échelle 1/1.
- La perspective n'est pas déformée et doit idéalement correspondre à notre perception réelle de l'espace.
- Les simulations développées pour la réalité virtuelle sont construites généralement autour de moteurs de jeu. Ces moteurs privilégient le nombre d'images calculées par seconde, ce qui se traduit par un ensemble de techniques permettant de générer à partir de géométries allégées des graphismes très réalistes en quasi-temps réel.

2D



3D

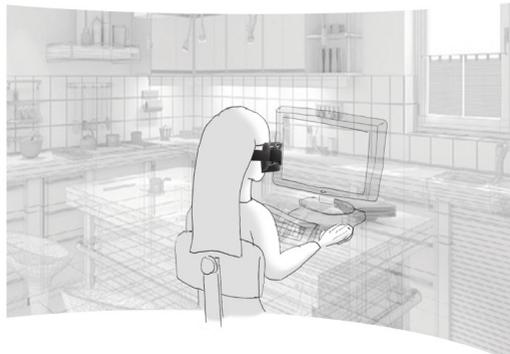
VS



Saut dimensionnel : passage de la 2D à la 3D
 (Photomontage basé sur une illustration de Flatland de Edwin
 A. Abbott ,1884)



VS



Volume 3D projeté sur une
 surface 2D, l'écran

Volume 3D perçu directement en 3D à
 échelle 1/1

Le saut dimensionnel de la réalité virtuelle
 (Photomontage)

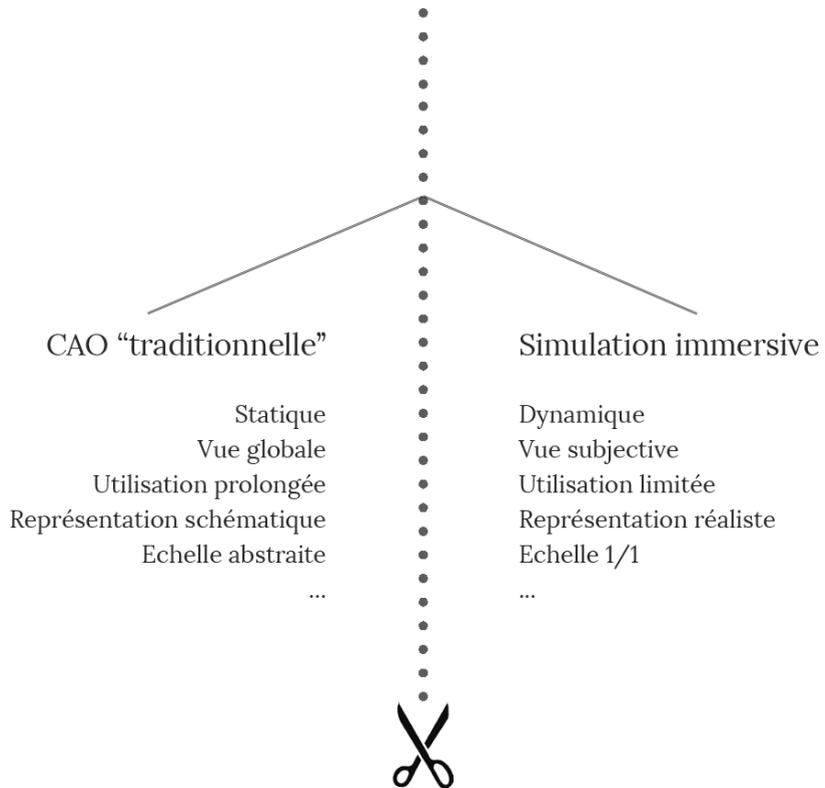
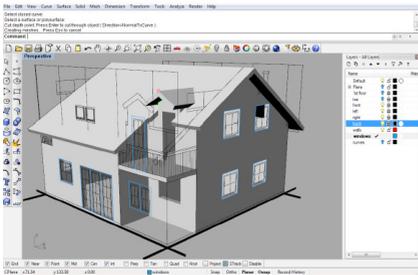
II. DIXIEVR

A. Outils Conceptuels

Il va de soi que ces divergences changent radicalement notre rapport à un modèle virtuel. Le processus de “dessin”, ou de génération d’un modèle dans un environnement immersif amène donc de nombreuses questions conceptuelles auxquelles nous avons tenté de répondre avec DixieVR.

Considérons par exemple le simple fait de changer de point de vue sur un objet virtuel, habituellement réalisé de façon très rapide et régulière en tournant la caméra dans les logiciels de CAO classiques. Cette action prend une tournure tout à fait différente en situation d’immersion. Car la réalité virtuelle offre une expérience intense et viscérale, et des mouvements brusques, répétés ou non naturels peuvent immédiatement provoquer une sensation d’inconfort, voire de malaise (le *virtual reality sickness*, ou *cybersickness*, assimilable au mal des transports).

Notre travail a donc consisté en grande partie à repenser l’intégralité du processus de conception d’un modèle numérique afin de l’adapter aux trois principes isolés précédemment (perception, interaction, coopération), eux-même découlant selon nous de la nature profonde du média utilisé.



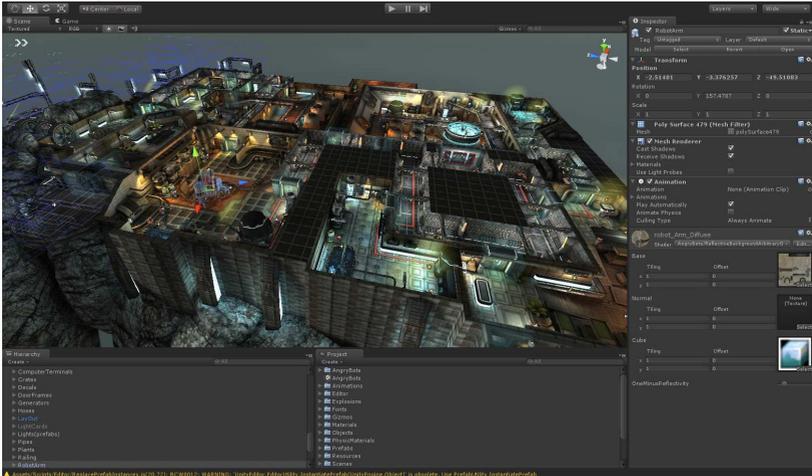
II. DIXIEVR

B. Ressources physiques et numériques

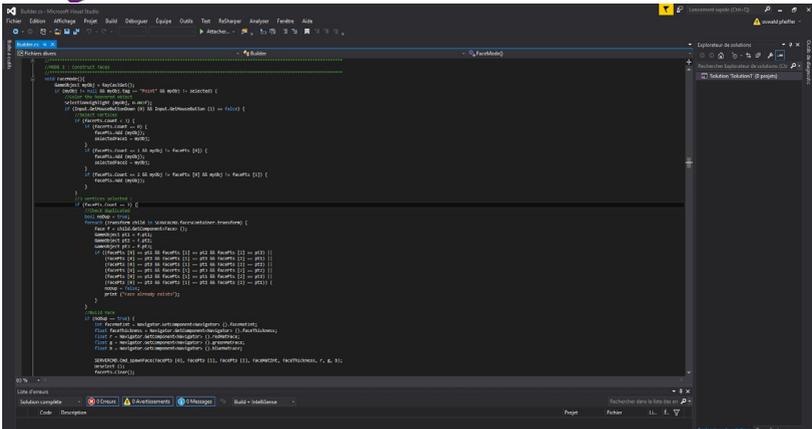
Notre démarche nous a rapidement poussé à adopter une position de développeurs d'applications de réalité virtuelle. Or, cette technologie en est encore à un stade relativement expérimental, et nous avons rencontré par ce fait un certain nombre de difficultés liées au matériel lui même ou aux librairies logicielles permettant de l'intégrer. Nous avons finalement du travailler avec des contraintes purement dépendantes de l'état de l'art et des dernières versions des kit développeurs mis en ligne par les constructeurs de casques de réalité virtuelle.

Tout le développement de DixieVR s'est fait sur Unity3D, un moteur de jeu disponible gratuitement pour les développeurs indépendants. Il est peu courant d'utiliser ce type de logiciels en architecture, c'est pourquoi il est important de bien discerner un moteur de jeu d'un logiciel de type CAO.

Un moteur de jeu permet d'assembler divers éléments (*assets*) dans le but de produire une scène où se dérouleront des événements. Il dispose également d'un ensemble de fonctions intégrées qui simplifient la création d'environnements de jeu (moteur physique et traitement de l'éclairage et des ombres entre autre). Les *assets* peuvent être des objets en maillage 3D (*mesh*), des textures, des sons, ou encore des scripts qui pourront être attachés à des objets afin de leur donner un comportement.



Interface de Unity3D



Programmation en C# dans l'environnement de développement
Microsoft Visual Studio Community

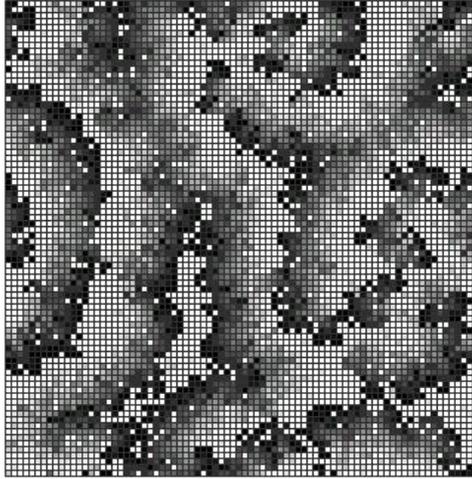
II. DIXIEVR

B. Ressources physiques et numériques

DixieVR s'inscrit dans la lignée des sandbox games, c'est à dire des jeux de simulation qui utilisent le principe de la génération procédurale : au lieu de définir une scène de manière précise, on définit des règles de comportement et d'assemblage d'éléments par le biais d'un ensemble de scripts, puis on laisse à l'utilisateur le choix de faire ce qu'il désire de ces éléments. C'est l'équivalent d'un jeu de construction, où le potentiel créatif d'un individu est généralement accru grâce aux contraintes posée par les règles du jeu.

Nous avons, pour gagner du temps en évitant de refaire ce qui a déjà été fait par d'autres, utilisé et adapté certaines bibliothèques rendues disponibles par la communauté des utilisateurs de Unity3D. Mais nous avons également en majeure partie écrit nos propres scripts en langage C# dans l'environnement de développement gratuit de Microsoft, Visual Studio Community.

Deux casques Oculus Rift DK2 (Developer Kit 2) étaient en notre possession au début de la recherche. L'école a ensuite reçu, au mois d'avril et suite à notre demande, deux casques supplémentaires Razer OSVR (Open Source Virtual Reality). Des bibliothèques logicielles pour Unity3D permettent d'intégrer ces dispositifs efficacement.



La génération procédurale et les simulations de type automates cellulaires ont en commun le pouvoir de former des phénomènes complexes à partir de règles locales et simples



Visiocasque Oculus Rift DK2 (2013)

II. DIXIEVR

B. Ressources physiques et numériques

Assez tôt s'est posé la question des dispositifs utilisable pour interagir avec la simulation une fois en immersion. Nous avons étudié la possibilité d'utiliser des capteurs de mouvements avec ou sans manette ou encore d'autres dispositifs de type souris 3D.

Nous avons finalement choisi de travailler uniquement avec une souris pour plusieurs raisons :

- Limiter et concentrer notre recherche sur l'utilisation de casques de réalité virtuelle pour la conception.
- Faire en sorte que DixieVR reste utilisable sans dispositifs trop spécifique, toujours dans une démarche d'ouverture et de travail collaboratif.
- Ne pas perdre du temps à intégrer des dispositifs qui deviendront obsolètes en quelques mois, sachant que la plupart des constructeurs de visiocasques sont en train, ou on déjà développé très récemment des capteurs de mouvements adaptés à leur technologie.
- Nous obliger à penser une interface simple ne nécessitant qu'une navigation à la souris à molette, pouvant éventuellement être adapté dans le futur à un dispositif de captation de mouvement plus abouti.



Visiocasque Razer OSVR



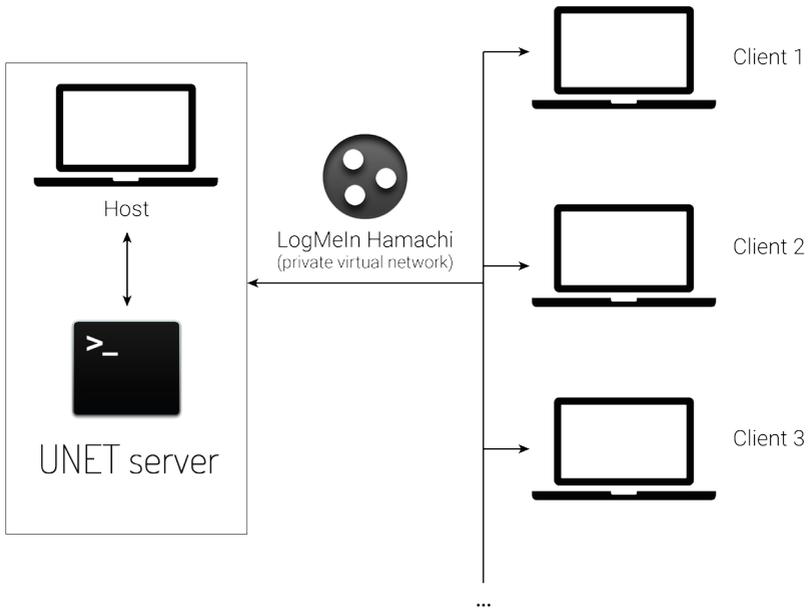
*Capteur de mouvements pour visiocasque HTC Vive
(disponibles à partir de juin 2016 en France)*

II. DIXIEVR

B. Ressources physiques et numériques

Afin de permettre à l'application de communiquer en réseau sur différents postes de travail pour la conception collaborative, nous avons choisi de mettre en place un réseau privé virtuel par le biais de LogMeIn Hamachi.

Au cours de l'exécution de DixieVR, une des machines sera désignée comme hôte tandis que les autres seront clients. L'environnement virtuel n'est par conséquent pas persistant : si l'hôte quitte l'application, tous les clients seront également déconnectés. Nous avons cependant intégré des fonctions de sauvegarde et de chargement d'une scène qui pallient la perte de données et qui permettent également de communiquer avec d'autres applications, comme nous le verrons plus loin.



Communication serveur/clients par le biais de LogMeIn Hamachi (Diagramme explicatif)

II. DIXIEVR

C. Interface et mécaniques de jeu

Une grande partie du travail de développement de DixieVR a concerné la mise en place de l'interface utilisateur et des fonctions qu'elle appelle.

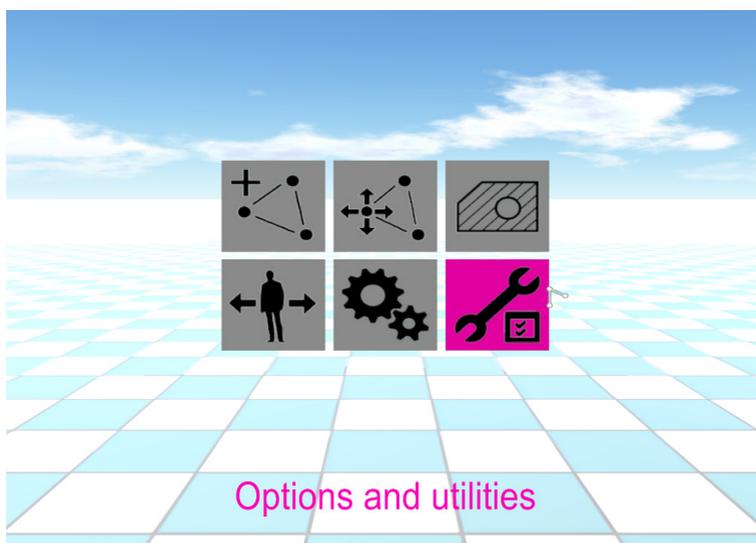
Il a également fallu penser la programmation de l'application pour un fonctionnement en réseau, ce qui a compliqué quelque peu l'ensemble du processus. Par exemple, les actions de créer, supprimer ou modifier un élément doivent devenir des requêtes envoyées au serveur, que celui-ci va devoir effectuer avant de synchroniser leur résultat chez l'ensemble des clients.

L'interface de DixieVR est scindée en deux parties :

1. **Le menu principal** ; permettant de rejoindre une simulation en tant que client, d'héberger une nouvelle simulation en choisissant un des deux environnements proposés ou de charger une simulation sauvegardée précédemment.
2. **Le navigateur** ; permettant d'accéder pendant la simulation aux diverses fonctions et options disponibles que nous allons exposer ci-après.



Menu principal de DixieVR



Navigateur permettant d'accéder aux fonctions de DixieVR

II. DIXIEVR

C. Interface et mécaniques de jeu

Génération de géométrie

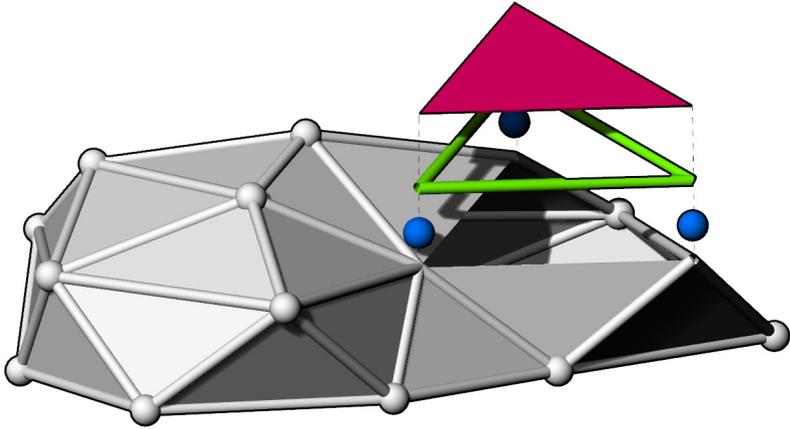
Regroupe les fonctions permettant de créer des objets.

La nature des objets de DixieVR est particulière : elle est en réalité calquée sur l'anatomie d'un maillage 3D. Il existe par conséquent trois principales primitives : les nœuds, les barres et les plans (correspondant à sommets, arrêtes, faces pour un mesh).

Une barre ne peut être créée qu'à partir de deux nœuds, et une face ne peut être créée qu'à partir de trois nœuds, rendant ainsi l'ensemble de la géométrie pratiquement uniquement dépendante de la position des nœuds dans l'espace. Cette relation est très avantageuse pour un ensemble de raisons sur lesquelles nous reviendrons.

Les barres peuvent être utilisées pour représenter des éléments architecturaux linéiques (poteaux, poutres...) et les faces pour représenter des éléments architecturaux surfaciques (parois, sol ou plafond...).

Un système d'accrochage et de projection à également été implémenté dans DixieVR pour permettre de placer les points avec une précision correcte dans l'espace.



Les trois primitives de DixieVR : noeuds/barres/plans
(Diagramme explicatif)



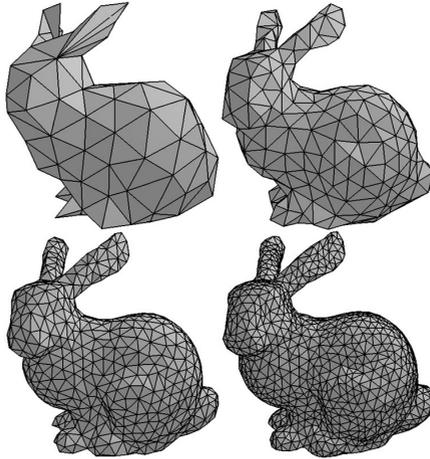
Structure carrée rappelant une serre dans DixieVR
Les plans sont ici en verre transparent.

II. DIXIEVR

C. Interface et mécaniques de jeu

Nous avons choisi ce système constructif pour les raisons suivantes :

- Il permet de décrire, par discrétisation, pratiquement n'importe quelle géométrie. La fidélité dépendra donc principalement de la résolution du maillage, en particulier pour les éléments courbes. Cette idée n'est ni plus ni moins celle du *mesh* en modélisation 3D.
- Son principe peut être assimilé à des règles du jeu simples mais offrant une grande modularité, permettant ainsi à n'importe quel utilisateur de prendre rapidement le logiciel en main.
- Nous pouvons le considérer comme appartenant à la famille des treillis spatiaux, dont le caractère universel a été largement exploré en architecture et en ingénierie. D'abord pour les ouvrages d'art au début du 19e siècle, puis pour des bâtiments au début du 20e siècle avec notamment les travaux de Buckminster Fuller sur le système MERO. Le comportement mécanique des treillis spatiaux peut, de plus, être simulé efficacement dans un moteur de jeu comme Unity3D et fournir des informations pertinentes sur l'isostaticité d'une structure.



Mesh 3D triangulé
La fidélité du modèle géométrique dépend de la densité du maillage



Serres du projet Eden (Tim Smit et Nicholas Grimshaw, 2001)
Système MERO

II. DIXIEVR

C. Interface et mécaniques de jeu

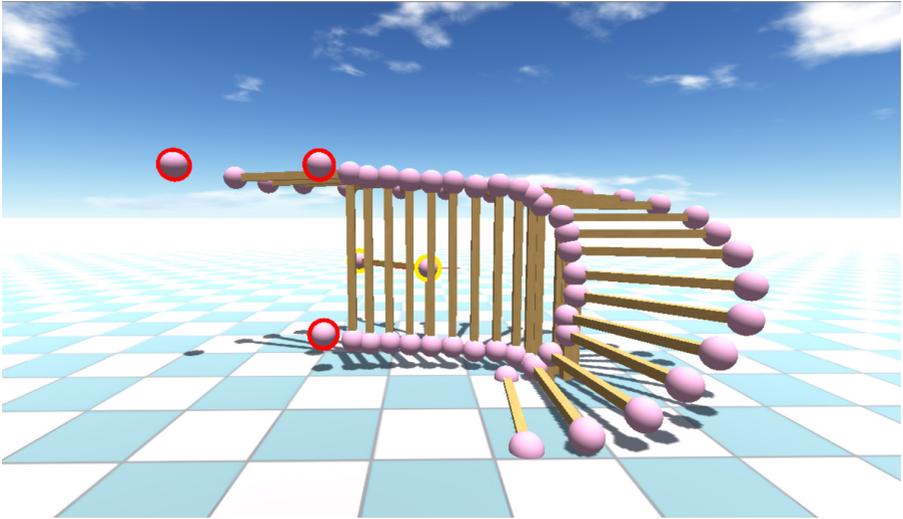
Modification et suppression d'objets existants

Permet d'une part de modifier localement les coordonnées d'un nœud en particulier ou de le supprimer.

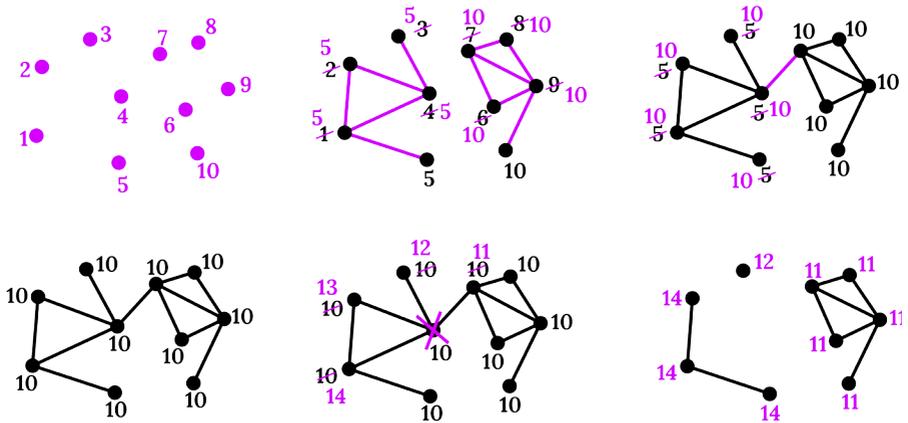
D'autre part, il est possible d'éditer un objet en tant que groupe. Les fonctions essentielles de transformations géométrique présentes dans tous les logiciels de CAO sont applicables :

- translation
- rotation
- symétrie
- changement d'échelle uniforme
- changement d'échelle non uniforme
- copie multiple

La reconnaissance des groupes d'éléments a demandé l'implémentation d'un algorithme spécifique : chaque nouveau nœud créé est doté d'un indice unique plus grand que le précédent. Chaque élément d'un groupe cherche à adopter l'indice le plus élevé possible parmi le sien et ceux de ses voisins. Si un groupe est scindé, chaque éléments voisin à la rupture se verra doté d'un nouvel indice unique. Chaque élément d'un groupe adoptera ainsi automatiquement un même indice unique. L'efficacité de l'algorithme dépend du fait que chaque élément porte en lui des informations relatives à ses éléments voisins.



Génération rapide d'une forme rappelant un escalier tournant en utilisant une copie incrémentale dans DixieVR



Algorithme de reconnaissance de groupes (diagramme explicatif)

II. DIXIEVR

C. Interface et mécaniques de jeu

Matériaux

Pour définir l'aspect par défaut des éléments générés ou pour modifier l'aspect d'un élément existant.

Matériaux pour les éléments linéiques :

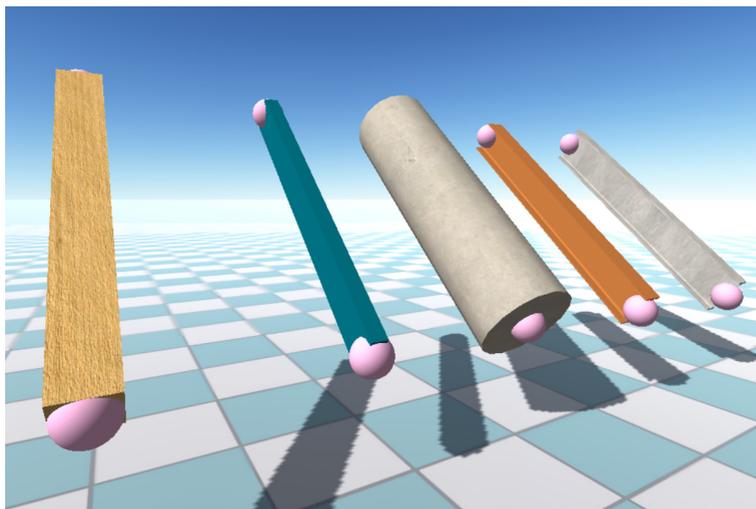
- Bois
- Acier
- Béton
- Générique (matériau peint)

Section pour les éléments linéiques :

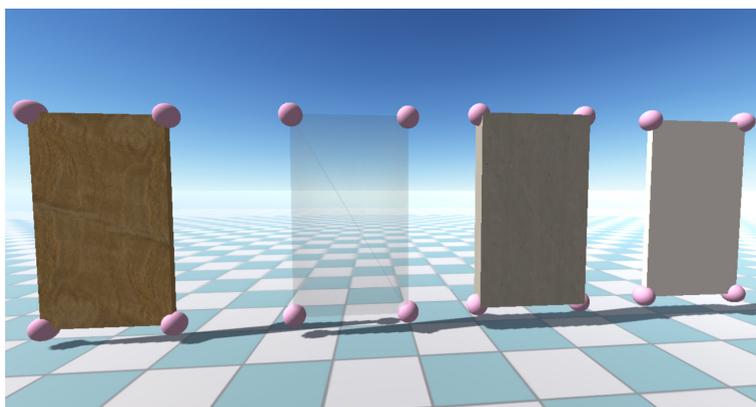
- Rectangulaire
- Circulaire
- IPN

Matériaux pour les éléments surfaciques :

- Bois
- Verre
- Béton
- Générique (matériau peint)



*Diverses sections et matériaux pour des éléments linéiques
dans DixieVR*



*Diverses épaisseurs et matériaux pour des éléments
surfacciques dans DixieVR*

II. DIXIEVR

C. Interface et mécaniques de jeu

Déplacements

Propose trois modes de déplacement différents :

- Déplacement au sol :

Mode “piéton”. L'utilisateur se déplace dans la direction où il regarde. La gravité l'affecte et il ne peut pas passer à travers les objets.

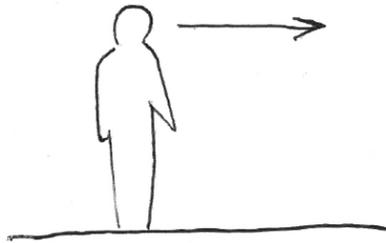
- Déplacement en l'air :

Mode “vol”. L'utilisateur se déplace dans la direction où il regarde. La gravité ne l'affecte pas et il peut passer à travers tous les objets.

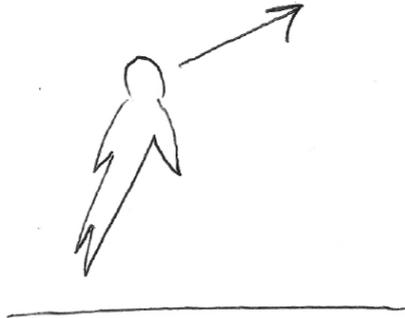
- Téléportation :

Aussi appelé “ghosting”. L'utilisateur crée un “fantôme” à son image qu'il peut contrôler à distance. Un aperçu semblable à un écran montre la vision du fantôme. Une fois que sa position est satisfaisante, l'utilisateur peut s'y téléporter.

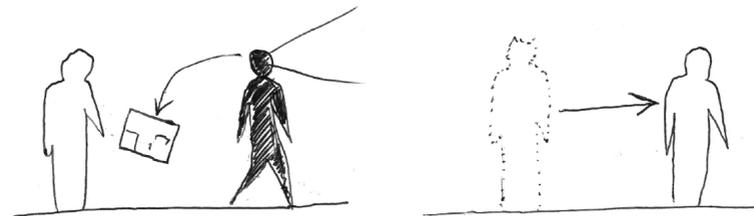
Un effort particulier à été mis en œuvre pour limiter au maximum le cybersickness via l'utilisation de transitions douces et de mouvements toujours effectués vers l'avant.



Déplacement au sol (schéma)



Déplacement en l'air (schéma)



Téléportation ou "ghosting" (schéma)



II. DIXIEVR

C. Interface et mécanique de jeu

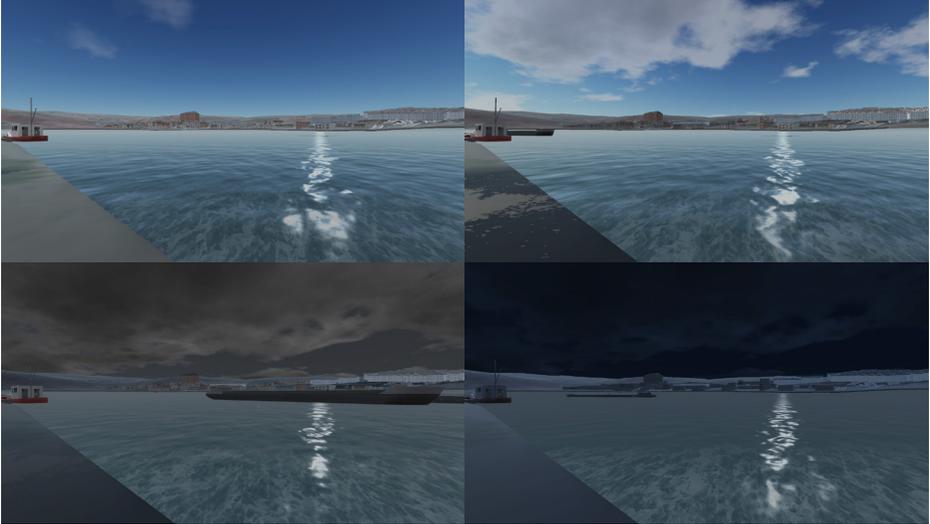
Simulation

Cet onglet réunit les fonctions permettant de simuler des phénomènes physiques.

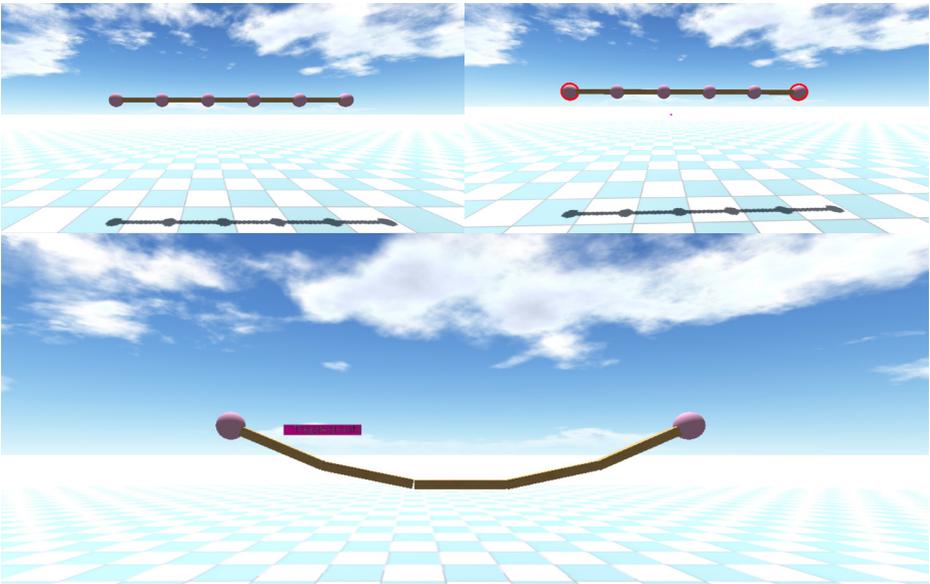
D'une part il est possible de modifier les conditions atmosphériques et l'éclairage naturel en fonction d'une date et d'une heure données. Cette fonction se sert de deux bibliothèques mises en ligne par la communauté de Unity3D.

D'autre part il est possible de simuler approximativement le comportement d'une structure filaire sous l'action de la gravité. L'utilisateur peut déclarer certains nœuds comme étant fixes, en faisant des points d'ancrage. Tous les autres nœuds vont agir comme des rotules tridimensionnelles.

La simulation physique est exécutée localement (son effet n'est pas synchronisé sur le réseau) et lorsqu'elle est stoppée tous les objets reprennent leur configuration initiale. C'est un outil pratique pour vérifier par exemple qu'une structure est correctement triangulée.



Simulation du temps, de la date et de l'heure dans DixieVR



Simulation physique d'une chaînette dans DixieVR

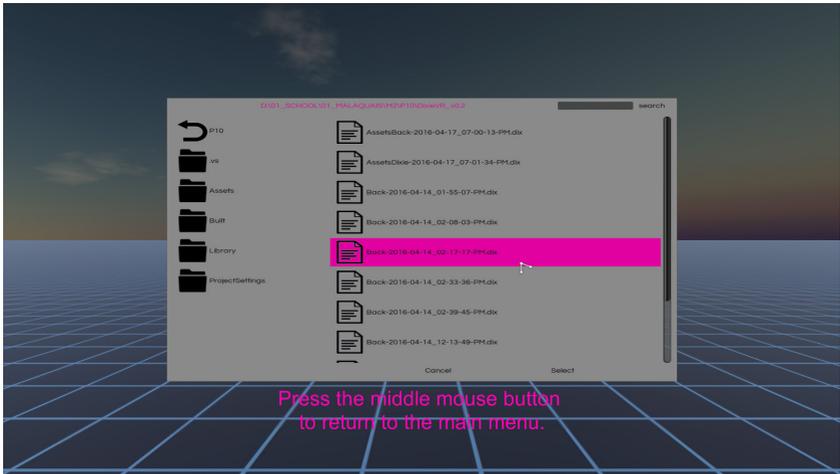
II. DIXIEVR

C. Interface et mécaniques de jeu

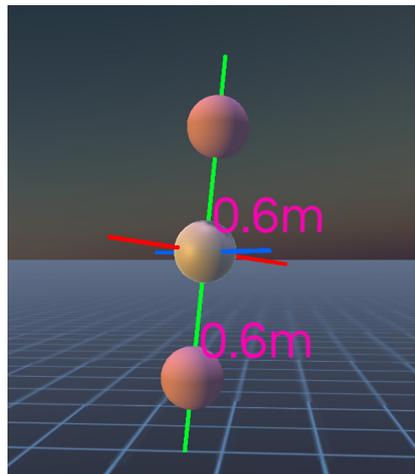
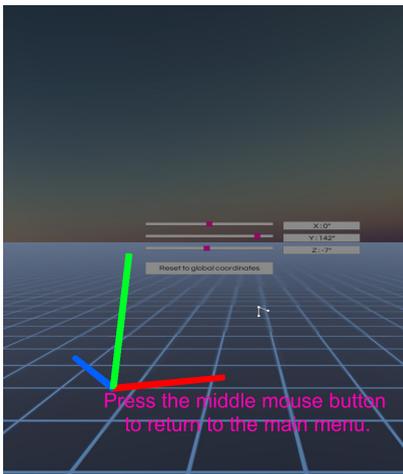
Options/outils

Contient :

- Des options d'affichage.
- Les fonctions d'import/export. Notons que DixieVR possède une librairie d'objets prédéfinis utilisables pour concevoir un modèle plus rapidement. DixieVR possède son propre format de fichier ".dix" que nous détaillerons dans la section E. *Interopérabilité*.
- Une fonction permettant de réaliser des captures d'écran.
- Une option pour orienter le repère local pour la génération d'objets.
- Un fichier d'aide consultable directement dans DixieVR.
- Une option pour quitter la simulation en cours.



Explorateur permettant d'importer un fichier .dlx dans DixieVR



Orientation du repère pour l'accrochage objet dans DixieVR

II. DIXIEVR

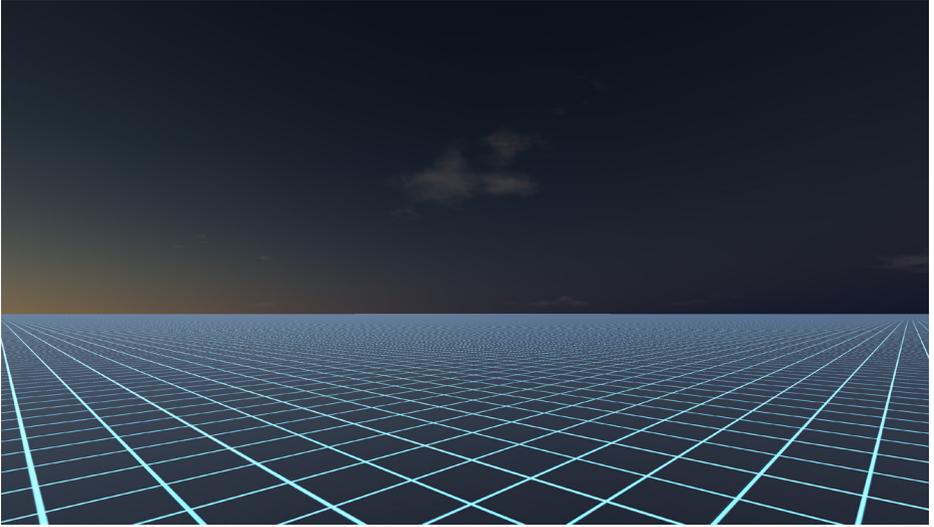
D. Simulation d'un environnement existant

Afin d'exploiter pleinement l'aspect immersif de la simulation, nous avons fait le choix de modéliser un environnement existant pouvant apporter un contexte urbain sur lequel s'appuyer pour concevoir avec DixieVR. Les caractéristiques visés dans cette tâche ne concernent pas uniquement le réalisme visuel ; la cohérence au niveau des interactions, les mécanismes et les informations offertes par le modèle comptent également.

DixieVR propose donc deux environnements :

- Un espace de modélisation vide prenant la forme d'une grille infinie
- Un territoire réel : une portion de la ville de Porto, Portugal

La modélisation 3D du site utilisé à été obtenue par le traitement de données GIS (Geographic Information System), principalement fournies par OpenStreetMap (bâtiments, routes, voies ferrées, cours d'eau), BingMap & USDA (textures du terrain), et NASA SRTM & USGS DEM (topographie du terrain). Ces données ont été traitées automatiquement par Infracore360 afin de générer un modèle 3D relativement précis du site. Ce dernier a ensuite été exporté vers Unity3D. La lourdeur et la complexité du modèle ont demandé une série d'optimisations afin de ne pas réduire les performances de la simulation et ainsi risquer de perdre en images par



DixieVR, Scene 1 (Grille infinie)



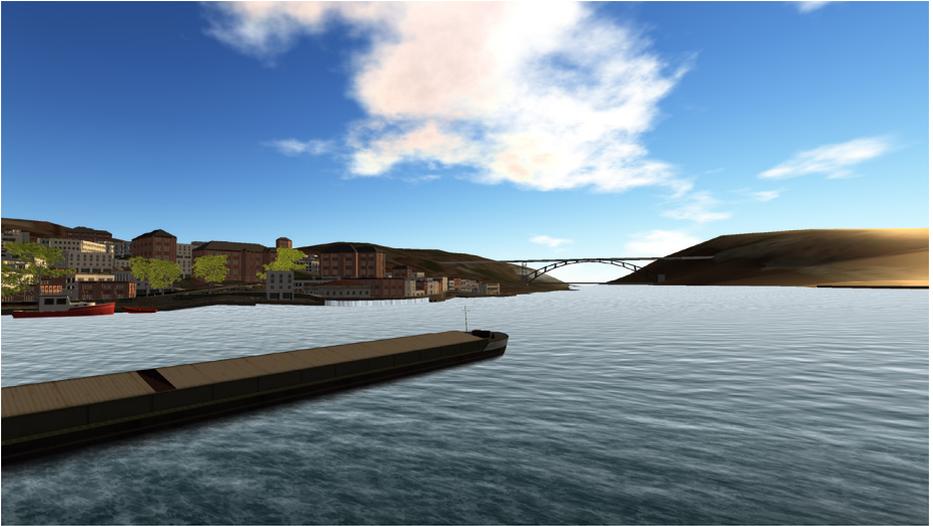
DixieVR, Scene 2 (Porto)

II. DIXIEVR

D. Simulation d'un environnement existant

seconde (sachant qu'une application de réalité virtuelle doit idéalement rester en permanence aux alentours de 75 images par seconde sur chaque oeil afin de ne pas rendre l'expérience inconfortable).

L'optimisation des performances effectuée après import dans Unity3D passe par la gestion des lumières (Global Illumination et Reflection), les objets statiques (Batching), le calcul des objets affichés (Occlusion Culling) et les paramètres graphiques (Rendering, Ombres et LOD).



DixieVR, vue sur le Pont Maria Pia



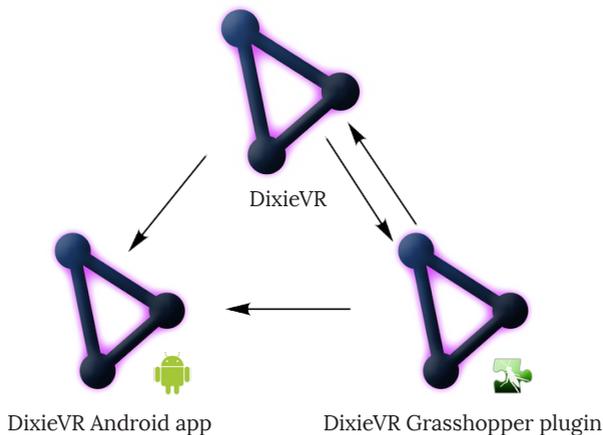
DixieVR, vue aérienne de la zone de Porto modélisée

II. DIXIEVR

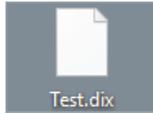
E. Interopérabilité

Le rôle principal de DixieVR est de permettre d'esquisser des espaces visuellement réalistes et immersifs rapidement et en coopération. Une des limites du logiciel se situe donc au niveau de la finesse des détails.

Afin de pouvoir détailler et retravailler les objets 3D construits dans DixieVR au sein d'un logiciel de CAO plus précis, nous avons créé un format d'échange possédant une extension ".dix". Ce format permet également d'importer des objets 3D venant d'autres logiciels, ou encore de visualiser des objets construits dans DixieVR sur une application Android pour Smartphone, compatible avec des casques de réalité virtuelle de type Google Cardboard.



Un fichier .dix s'organise comme suit (commentaires en rose) :



DIXIEVR

Signature et version

1.0

*

Informations & copyright

DixieVR v1.0

Immersive Multi-User Simulation for Architectural
Conception

Oswald Pfeiffer & Mathieu Venot

© 2015 DixieVR

All right reserved.

*

Index de la scène où a été modélisé l'objet

0

*

Noeuds (coordonnées)

-15.925,-7.79,3.491

-25.939,-7.79,3.491

-25.939,-17.97,3.491

-15.942,-17.97,3.491

*

Barres (indices des noeuds utilisés, matériau et section)

1,3,1,1,0.2989796,0.2989796,1,1,1

0,2,1,1,0.2989796,0.2989796,1,1,1

*

Faces (indices des noeuds utilisés, matériau et épaisseur)

0,1,2,1,0.297449,1,1,1

*

Point lights (coordonnées, intensité, couleur)

-30.439,-10.486,5.705,3.742,0.6,0.4,0.43,3.01,43.1,155.46

*

Spotlights (coordonnées, intensité, angle d'ouverture, couleur)

-34.587,-8.360001,3.363,-28.03, -9.332001,4.752,0.89,0.93,0.43,3.01,43
.1,155.46

*

Points de vue définis (coordonnées)

-25.939,10.79,4.50

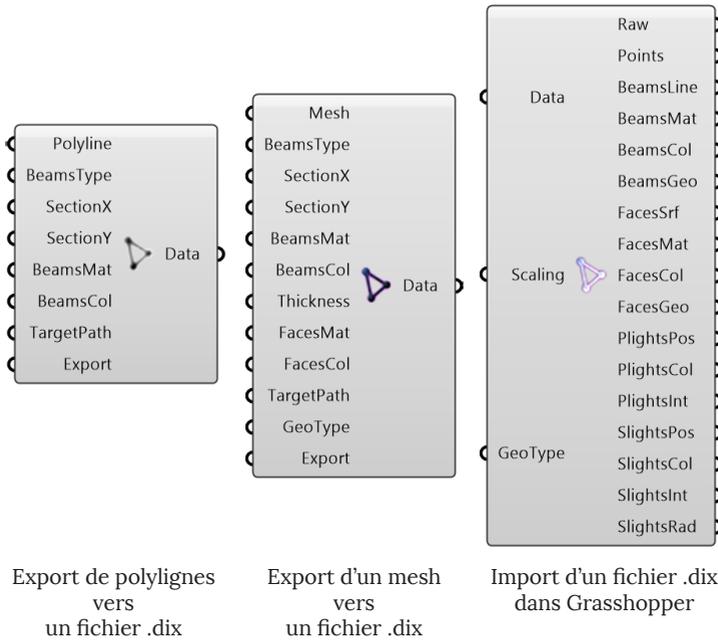
*

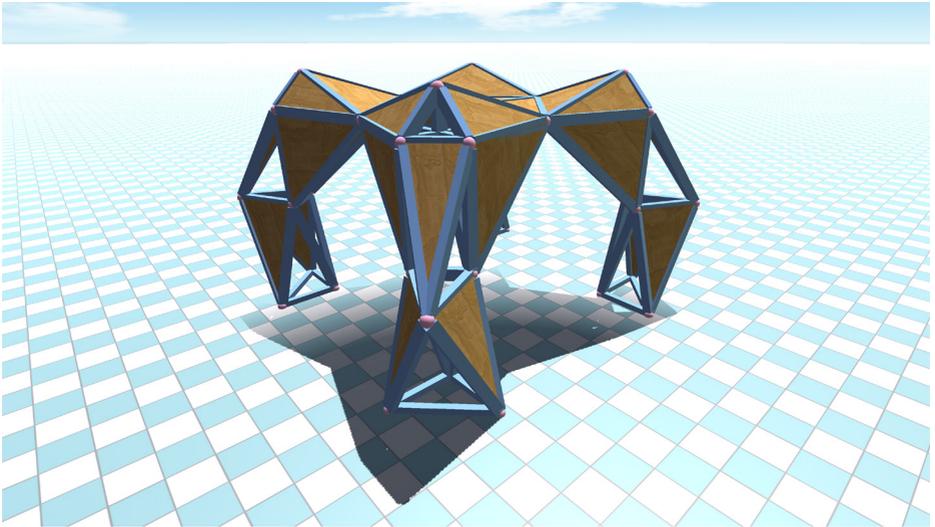
II. DIXIEVR

E. Interopérabilité

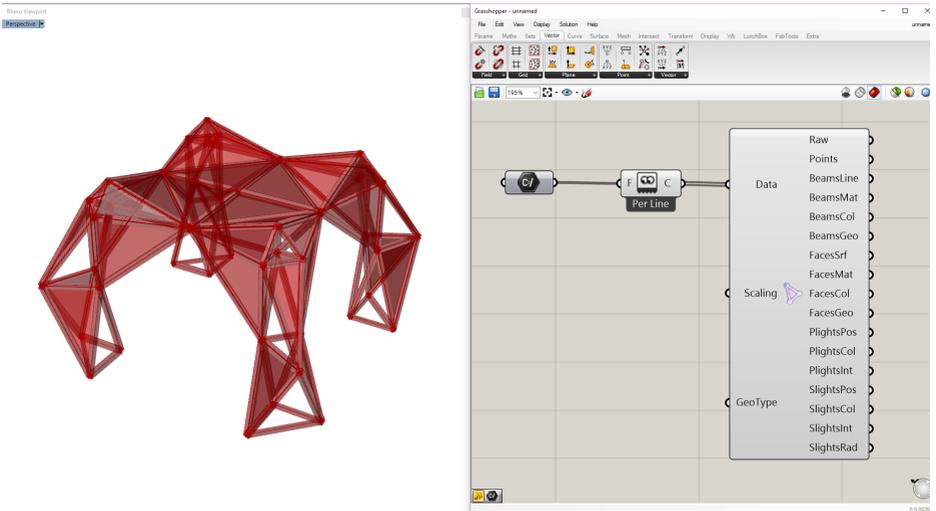
Plugin pour Grasshopper

Pour permettre à la fois d'importer de la géométrie issue de DixieVR dans Rhino ou Grasshopper, et d'exporter de la géométrie provenant de Rhino ou Grasshopper vers DixieVR, nous avons codé 3 composants se présentant sous la forme d'un plugin pour Grasshopper.





Pavillon modélisé dans DixieVR



Même pavillon, importé dans Grasshopper grâce au composant DixieVR to Grasshopper

II. DIXIEVR

E. Interopérabilité

Application pour Android

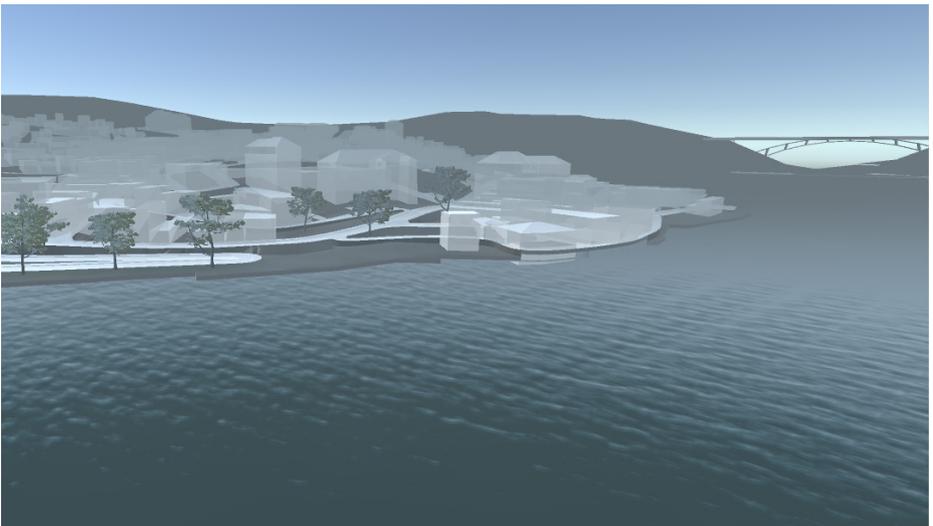
Il nous a semblé judicieux de créer une version mobile de DixieVR, pouvant permettre uniquement d'importer un fichier .dix afin de le visualiser.

Les points de vues sont définis auparavant dans DixieVR. Un simple bouton sur le côté du casque permet de passer d'une vue à une autre.

Ces casques offrent une expérience beaucoup moins immersives mais ont l'avantage d'être facilement accessible et de n'importe où.



Casques de réalité virtuelle “Cardboard”, adaptés aux smartphones



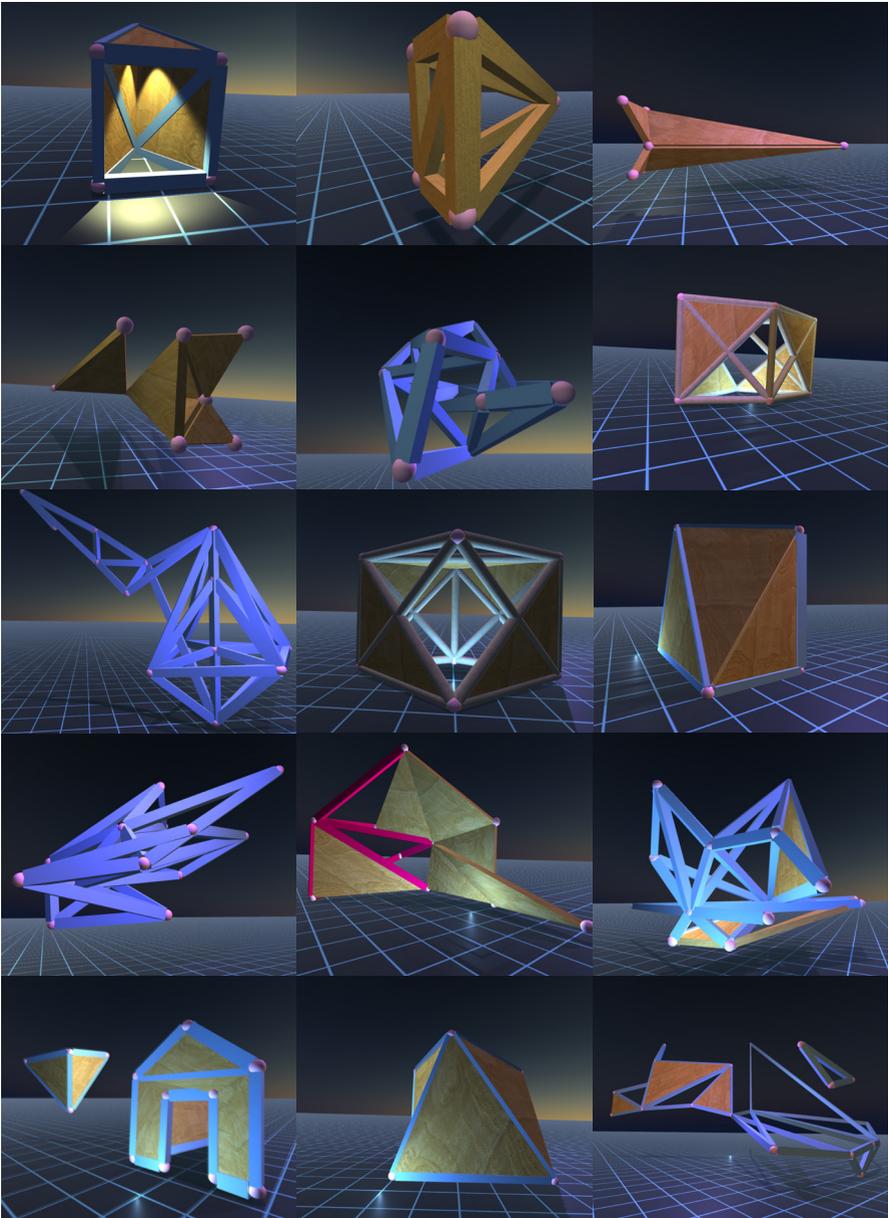
Version allégée de DixieVR pour Android

II. DIXIEVR

F. Production

Bêta testeurs (Événement La Boucle Wild Ride 08/05/16 au Batofar)



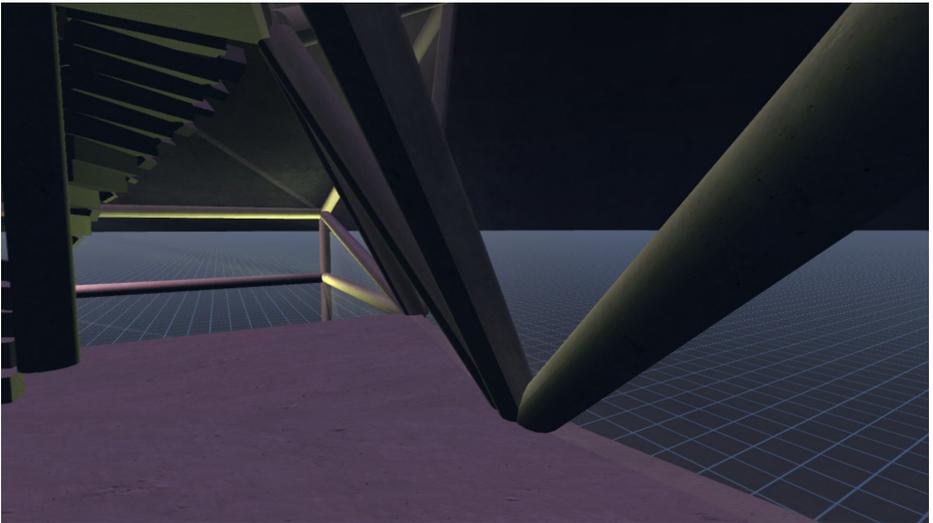
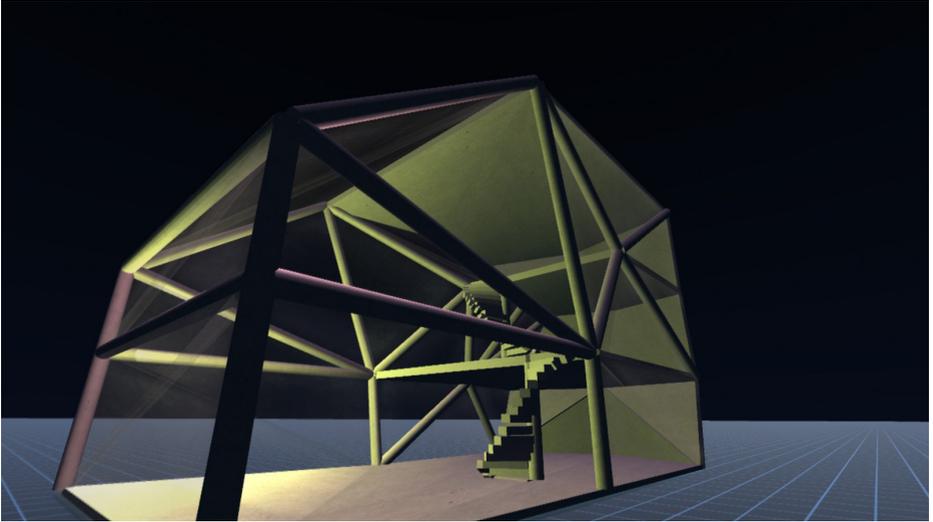


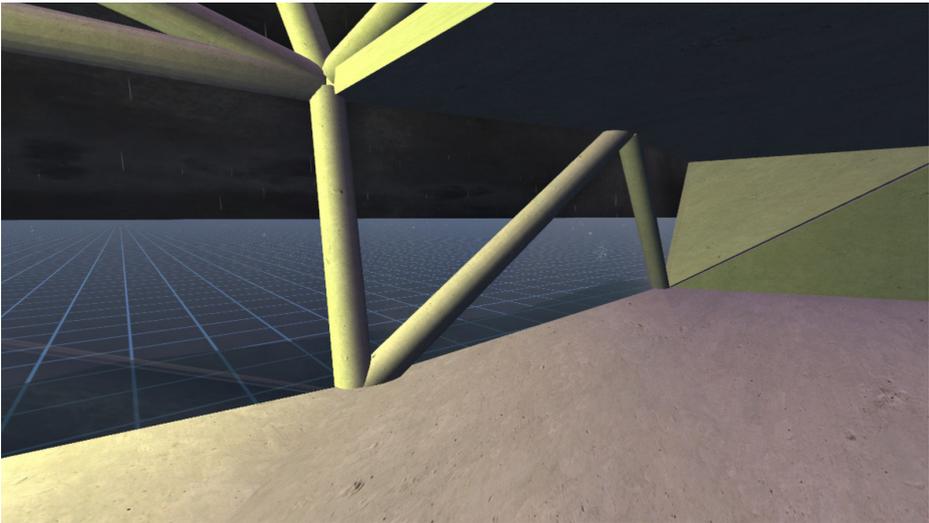
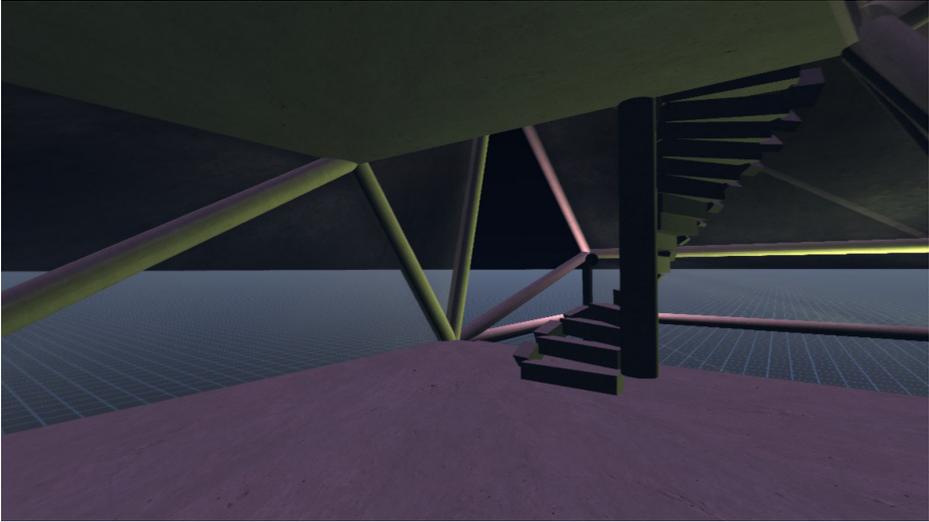
Objets modélisés par les testeurs en quelques minutes lors d'une première prise en main du logiciel

II. DIXIEVR

F. Production

Esquisse 3D d'un bâtiment verre et béton
(1 personne en immersion/25 minutes)





II. DIXIEVR

F. Production

Esquisse 3D d'un pavillon

(2 personnes en immersion/15 minutes)

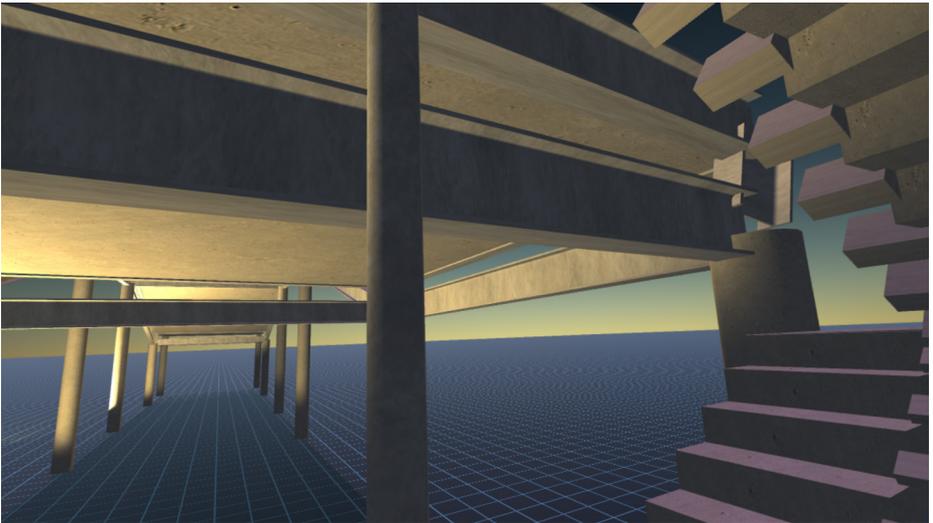
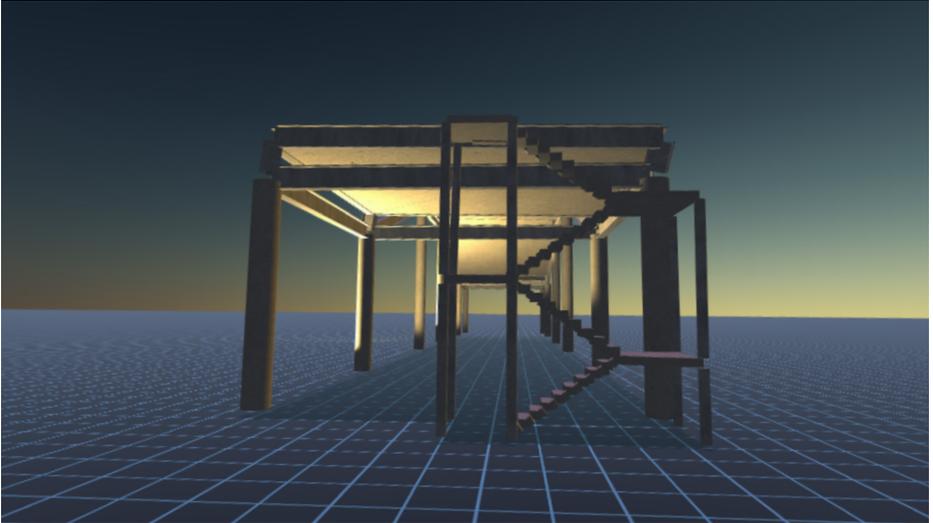


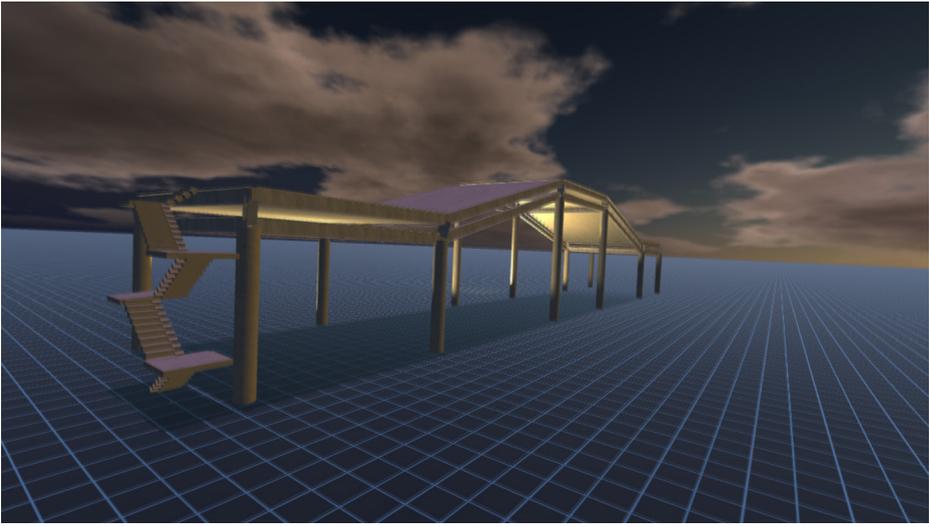
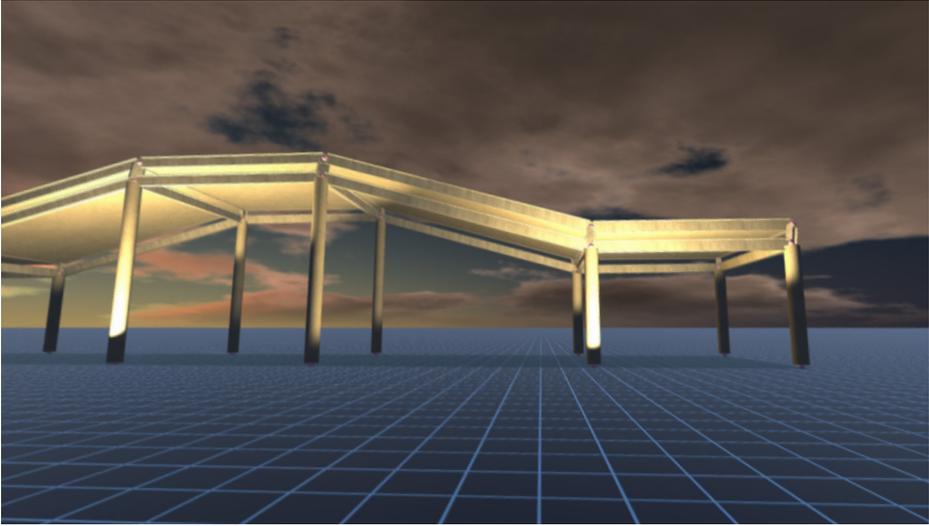


II. DIXIEVR

F. Production

**Esquisse 3D d'une structure en portiques
(1 personne en immersion/20 minutes)**

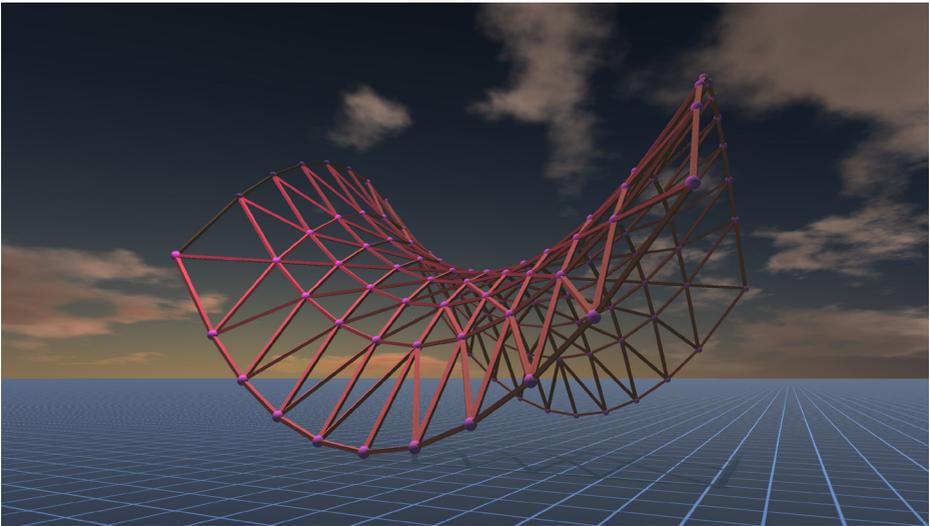
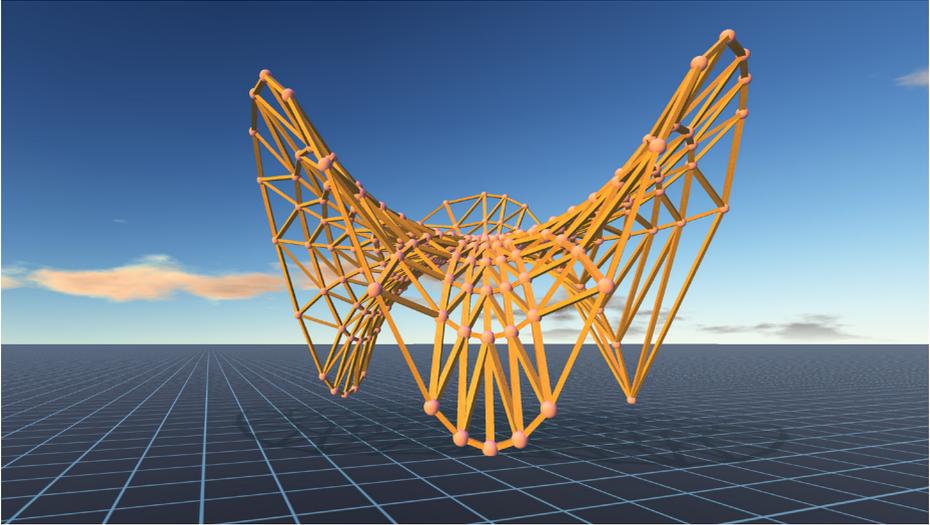


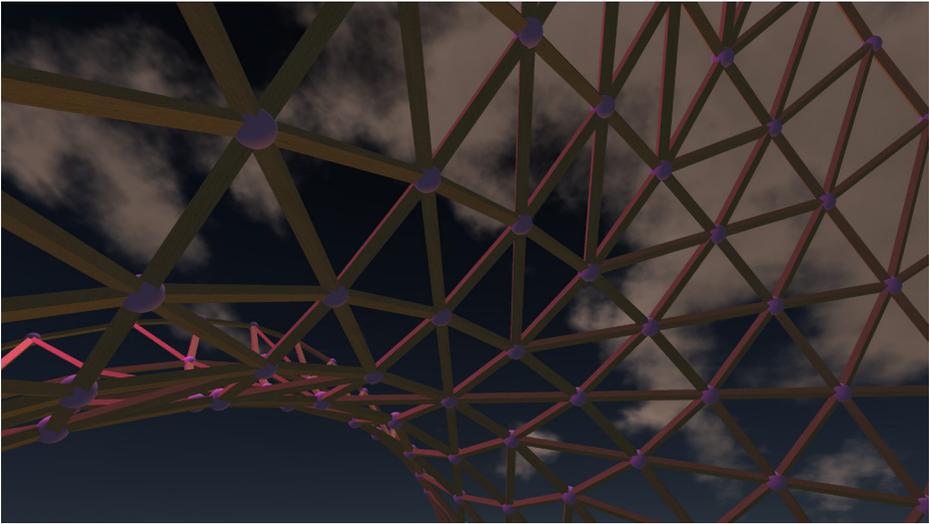
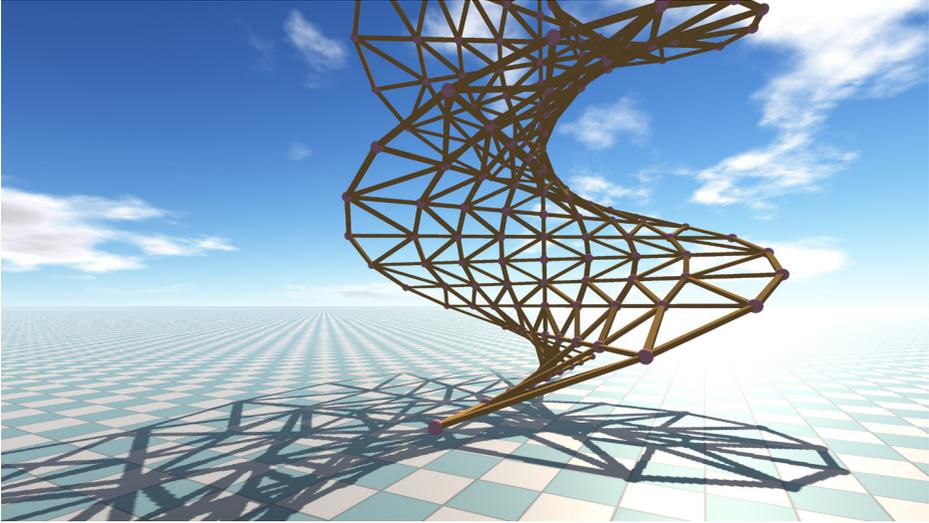


II. DIXIEVR

F. Production

**Objets dérivés de surfaces minimales,
générés dans Grasshopper puis importés dans DixieVR.**





II. DIXIEVR

G. Conclusion, potentiel et perspectives

L'objectif que nous nous étions fixé pour notre recherche était de permettre d'esquisser en coopération des volumes et des espaces architecturaux en exploitant le principe de *présence* (la sensation d'être physiquement présent dans le modèle, comme on pourrait l'être dans un espace physique du quotidien).

En considérant les exemples des pages précédentes, nous considérons que ce premier objectif à été atteint. Cependant, DixieVR ne représente finalement qu'un peu moins d'une année de travail accomplie par deux personnes qui ont appris à programmer et à utiliser des technologies de réalité virtuelle en quasi-autonomie.

DixieVR est actuellement une version bêta, mais nous pouvons déjà imaginer de nombreuses évolutions et perspectives le concernant. Le faisant passer d'un stade de Sandbox Game à celui d'un logiciel de conception professionnel.

Cette section a pour but d'exposer un certain nombre de directions vers lesquelles DixieVR pourrait évoluer dans le cadre d'un développement à plus long terme.

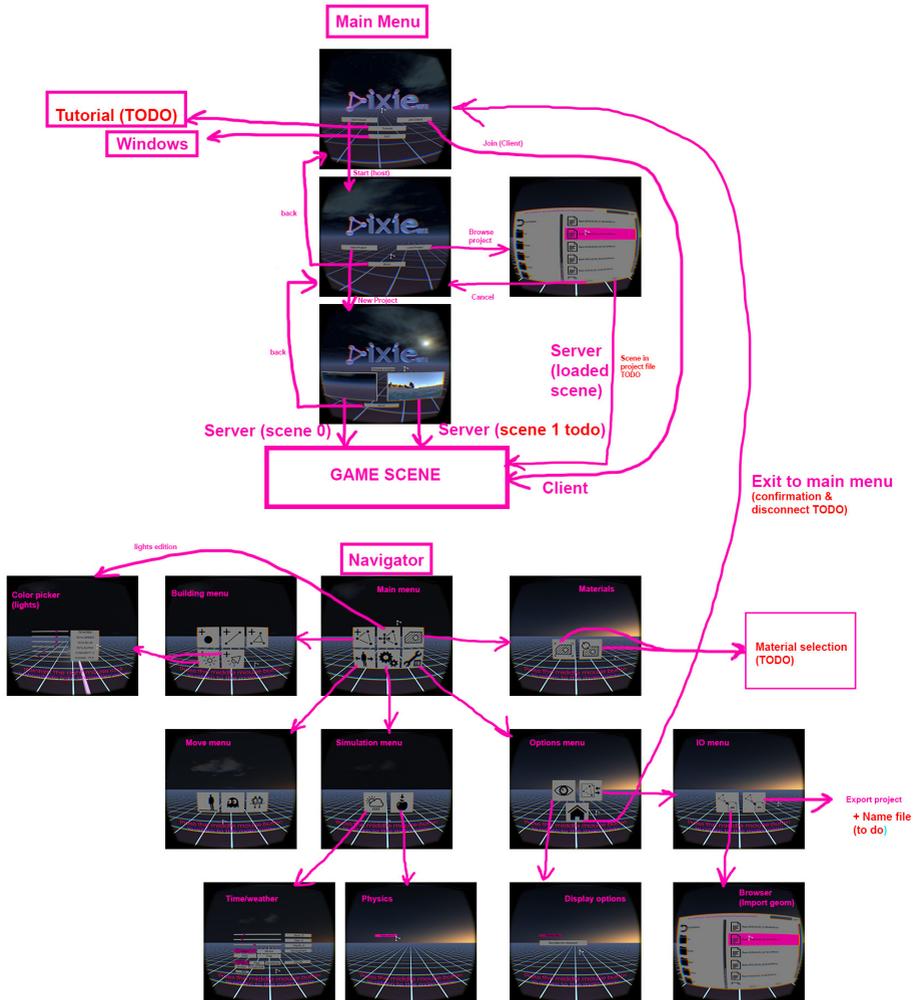


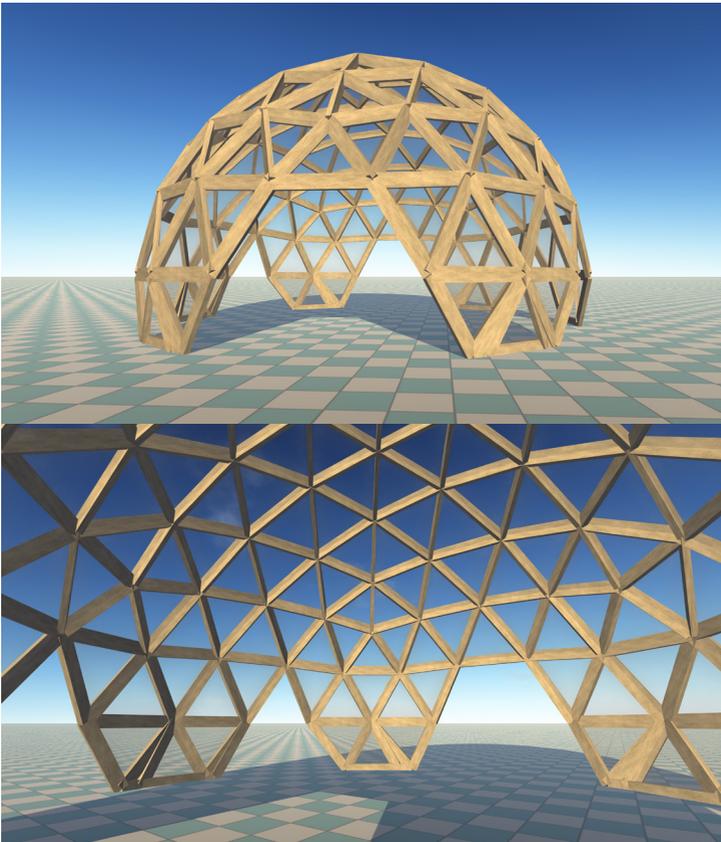
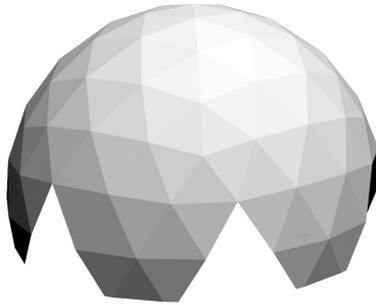
Diagramme schématique de l'interface de DixieVR

II. DIXIEVR

G. Conclusion, potentiel et perspectives

Ce que permet de faire DixieVR aujourd'hui :

- Esquisser rapidement un espace en 3 dimensions de façon relativement précise à échelle architecturale. Le tout en immersion, seul ou à plusieurs en coopération.
- Importer facilement une géométrie créée avec DixieVR dans Grasshopper, connectant ainsi DixieVR à un écosystème de logiciels existants utilisés dans la conception architecturale.
- Inversement, importer une géométrie issue de Rhino ou Grasshopper dans DixieVR en la rendant aussi manipulable qu'une géométrie native de DixieVR.
- Offrir une perception réaliste de l'espace passant par un large panel d'ambiances dynamiques et par la simulation d'un contexte urbain réel.
- Simuler sommairement le comportement d'une structure en treillis sous l'action de la gravité.
- Visualiser rapidement un projet en réalité virtuelle sur smartphone par le biais de l'application Dixie pour android, que celui-ci ait été créé directement dans DixieVR ou sur Grasshopper.



Export d'un mesh 3D créé dans Rhinocéros (en haut)
vers DixieVR (deux images du bas)

II. DIXIEVR

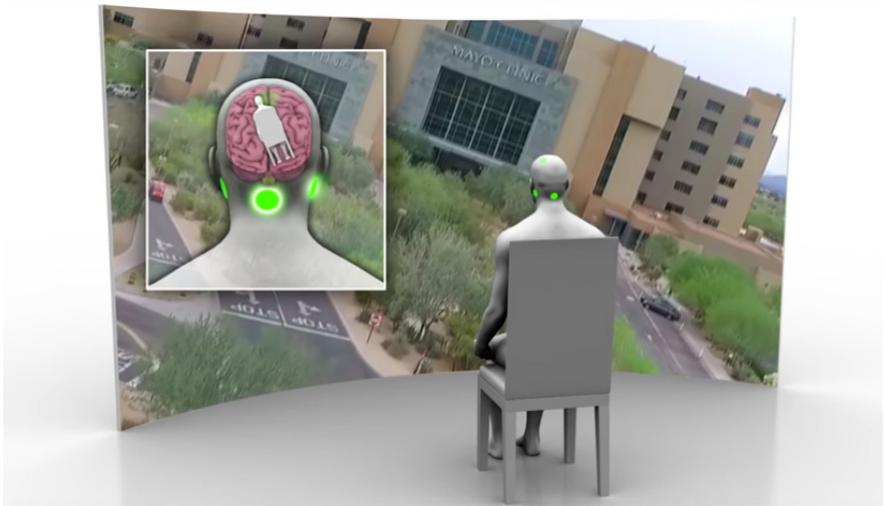
G. Conclusion, potentiel et perspectives

Limites du logiciel et quelques évolutions potentielles :

- Seulement quelques matériaux sont disponibles, il serait intéressant de lier le logiciel à une large bibliothèque de matériaux et d'éléments standards.
- Les performances du logiciel sont limitées, notamment par le nombre d'éléments pouvant être affichés dans une scène (environ 1000 barres et 700 faces, ce qui est peu pour définir le modèle d'une architecture de taille importante).
- Le travail à la souris a été une contrainte matérielle avant tout, l'évolution rapide des technologies de réalité virtuelle nous laisse penser que l'utilisation de capteurs de mouvement précis comme ceux qui ont été mis sur le marché depuis peu par Oculus ou HTC serait bien plus efficace et immersif.
- De même, l'amélioration des casques nous permet d'envisager la disparition dans un futur proche de certaines contraintes techniques (cybersickness empêchant l'utilisation prolongée du logiciel, déplacements toujours peu intuitifs, résolution trop basse de l'image...), et pourquoi pas à long terme le couplage avec d'autres interfaces de pointe (reconnaissance vocale, interface cerveau/machine...).
- Si nous avons choisi de travailler avec un système



Les casques EEG (Électroencéphalographie) deviennent eux aussi progressivement plus compacts, performants et accessibles



*Mayo Clinic - Galvanic Vestibular Simulation (GVS) - 2016
Système en étude stimulant certaines zones du cerveau au cours
des déplacements en réalité virtuelle pouvant potentiellement faire
disparaître le cybersickness*

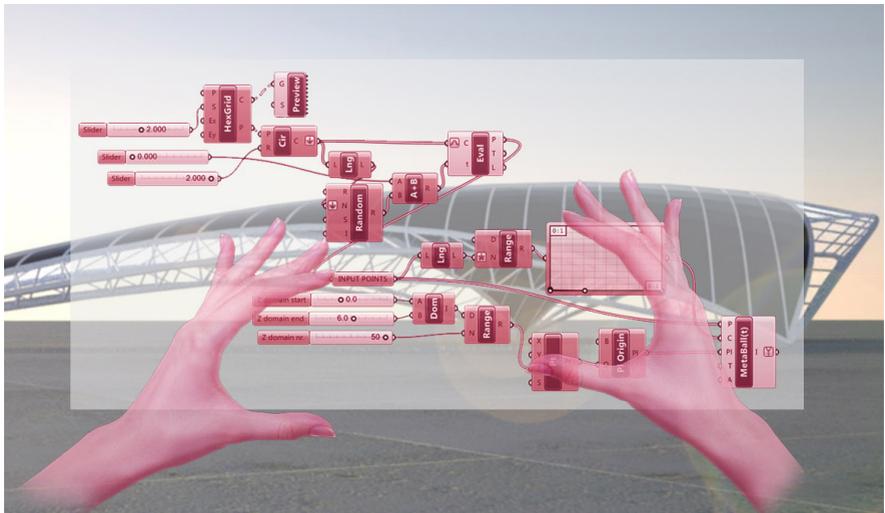
II. DIXIEVR

G. Conclusion, potentiel et perspectives

constructif en treillis offrant un maximum de liberté pour un minimum de “règles du jeu”, nous pouvons envisager l’implémentation de fonctions de modélisation aussi robustes et puissantes que dans un modèleur 3D classique tel que Rhino ou 3DS Max. La modularité du logiciel pourrait comprendre également des fonctions de programmation visuelle et de modélisation paramétrique à l’instar de Grasshopper.

- L’import de données géographiques et urbaines pourrait être automatisée, permettant potentiellement de simuler n’importe quel site sur terre. De même, la simulation physique en temps réel, qui est un des avantages considérables d’une architecture logicielle basée sur un moteur de jeu, pourrait devenir bien plus complète et réaliste. La simulation acoustique aurait également bien des avantages à être couplée à l’immersion visuelle.

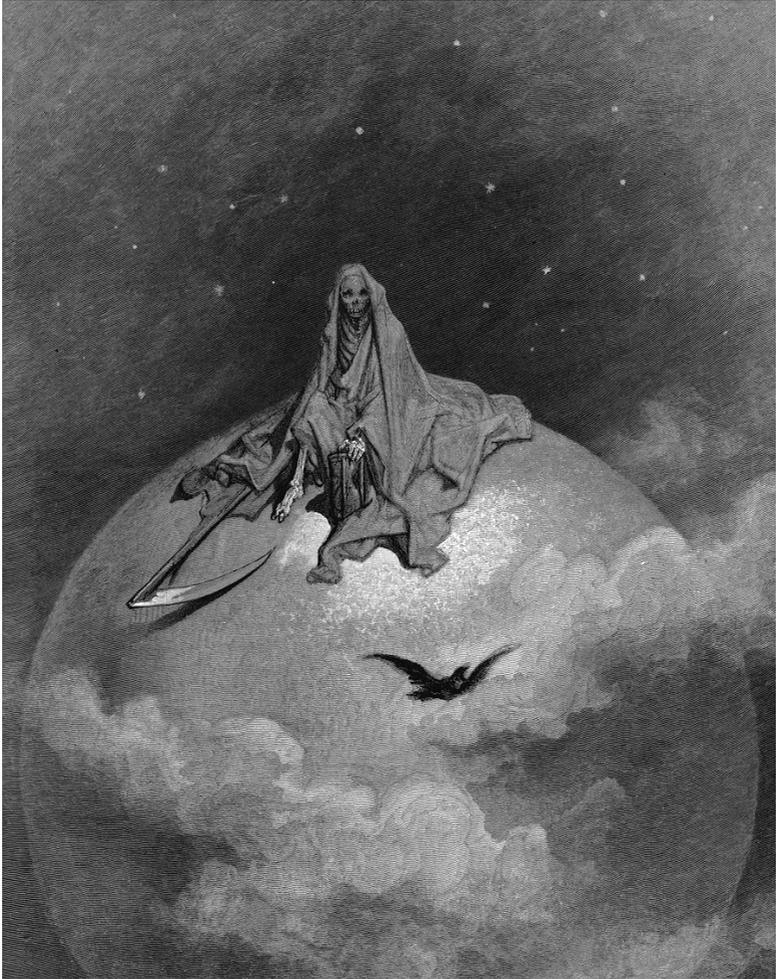
- La partie réseau de DixieVR pourrait être renforcée afin de permettre à un nombre d’utilisateur important de travailler simultanément, en définissant des rôles et des droits d’accès au modèle correspondant, y compris un rôle de simple spectateur. En rendant les mondes persistants, nous pouvons également imaginer une société ou l’architecture se conçoit “en direct” et publiquement dans le monde virtuel où chacun peut assister ou participer littéralement à son échelle à la production de la ville.



Design paramétrique en immersion
(Photomontage)



Produire la ville collectivement, immergés dans le Cloud
(Photomontage)



*“Doubting, dreaming dreams no mortal ever dared to dream before”
Illustration de Gustave Doré pour The Raven (Edgar Allan Poe, 1884)*

III. LA MORT DE L'HOLOGRAMME

Acceptation et Accélération

III. LA MORT DE L'HOLOGRAMME

Avant-propos

Nous sommes conscients que la vitesse avec laquelle évoluent les technologies immersives rendra bientôt notre travail obsolète et que les limites contre lesquelles nous butons aujourd'hui deviendront caduques d'ici à peine quelques mois ou années.

C'est pourquoi nous désirons que notre travail soit compris avant tout comme une recherche plus large et théorique concernant le processus exponentiel de virtualisation de notre société. Ce sujet nous intéresse fortement en tant que futurs architectes car nous sommes convaincus de la nature profondément spatiale du phénomène dans sa globalité.

Afin d'ouvrir la discussion sur ce sujet, nous proposons ici un texte théorique, entre manifeste et fiction spéculative, qui envisage de façon abstraite un futur où les technologies immersives seront si présentes que notre "réel" en sera totalement imprégné.

III. LA MORT DE L'HOLOGRAMME

02

L'ailleurs et l'extérieur sont des concepts qui ne signifient rien pour nous, nous ne sommes plus qu'auto-référence.

Car nos réalités ne sont plus données mais façonnables.

Nous n'avons d'ailleurs plus de raison de chercher la vie ailleurs que sur Terre. A quoi bon mener de périlleuses expéditions pour ne trouver que bactéries et poussière lorsque nous avons le pouvoir de construire n'importe quel monde de toutes pièces ?

Simuler le multivers : éclipse totale.

03

L'hologramme est mort, sa substance sublimée.

Continuer à transformer la matière est vain une fois que l'on a une emprise sur le véritable siège des métamorphoses : la perception humaine.

Nos corps sont mis en réseau et une infinité de réalités artificielles sont ainsi partagées explicitement par la stimulation directe de nos sens.

La chair est reprogrammable.

04

New York, Singapour, Milan, Johannesburg, São Paulo, Kyoto : mêmes intervalles, à 0,00006 seconde de latence près.

Changement d'espace-temps en un battement de cil.

Au rythme des paquets d'octets qui déferlent, nos corps sont projetés avec célérité d'une coordonnée de l'espace à une autre. La notion de distance a entièrement laissé place à celle de droit d'accès.

Briser la ligne d'horizon.

05

Pendant un temps, nous avons tenté de ralentir notre course. Nos savants, formels, savaient que notre espèce courrait à sa perte, que nos ressources s'épuiseraient et que notre environnement s'écroulerait.

Mais s'acharner à sauver le système était vain. C'est pourquoi nous nous mirent à accélérer sa mort.

Car vint enfin le jour où, au bord du chaos, l'humanité donna vie à une machine capable de penser.

Opus magnum.

III. LA MORT DE L'HOLOGRAMME

06

Les derniers humains hors-ligne ont maintenant disparu depuis des siècles.

Pas de bouton OFF sur la chair augmentée : tous oxygénés par le Cloud, du premier au dernier soupir.

Une seule seconde connecté et tout souvenir du réel se fane instantanément. Comment résister à une perception éclatante ?

Plongé dans le terrier, Alice !

07

Le monde composé d'atomes n'a plus qu'un intérêt fonctionnel pour nous. Nous n'y accédons plus qu'à travers des images ou des simulations.

La vie sauvage a repris ses droits sur la planète.

Toute trace du passage de l'homme sur Terre a commencé à s'effacer depuis son choix, conscient, d'œuvrer à sa propre dématérialisation.

Extinction de l'espèce.

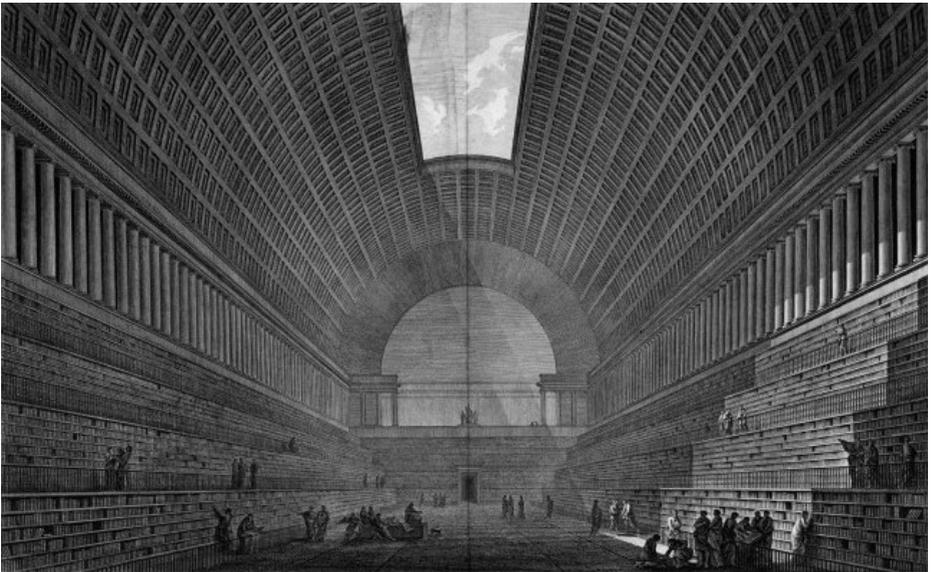
08

Dans les entrailles de la croûte terrestre se trouvent nos installations.

Derrière des parois monolithiques, dans l'obscurité la plus totale, une nuée de machines intelligentes fourmillent pour préserver l'équilibre de nos mondes virtuels.

Et c'est ici, enseveli dans les ténèbres, que nous traversons des hallucinations collectives d'une clarté aveuglante.

Fin du cauchemar, entrée dans le rêve lucide.



*Second projet pour la Bibliothèque Royale
Dessin d'Etienne Louis Boullée, 1786*

IV. BIBLIOGRAPHIE

Architecture

BENEDIKT Michael, *Cyberspace. First steps*, Cambridge, The MIT Press, 1992

CARPO Mario, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, The MIT Press, 2011

CARPO Mario (dir.), *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*, New Jersey, John Wiley & Sons, Architectural Design Reader, 2013

HUBERS J.C., VAN VEEN Misja, KIEVID Chris (dir.), *Game Set and Match I*, Delft, Delft University of Technology Faculty of Architecture, 2001

NOVAK Marcos, *Liquid Architectures in Cyberspace*, Cambridge, MIT press, 1991

OOSTERHUIS Kas, FEIREISS Lukas (dir.), *Game Set and Match II. On Computer Games, Advanced Geometries, and Digital Technologies*, Delft, Delft University of Technology Faculty of Architecture, 2006

SANCHEZ Jose, *Gamescapes*, Londres, Studio Course Master at The Bartlett, 2013

SANCHEZ Jose, *Hacklikes. Weird Interactions Between Things*, TxA Interactive, 2013

SANCHEZ Jose , *Post-Capitalism Design. Design in the Age of Access*, ACADIA 2014

SPILLER Neil (dir.), *Architects in Cyberspace*, New Jersey, John Wiley & Sons, Architectural Design, Decembre 1996

SPILLER Neil (dir.), *Architects in Cyberspace II*, New Jersey, John Wiley & Sons, Architectural Design vol 68, Novembre-December 1998

Documentation Technique

OCULUS VR, *Best Practices Guide*, http://static.oculus.com/sdkdownloads/documents/Oculus_Best_Practices_Guide.pdf

WALKER John, *Through the Looking Glass*, Note de service d'Autodesk, 1988

Fiction

ABBOTT Abbott Edwin, *Flatland*, Londres, Seely & Co., 1884

BRADBURY Ray, *The Veldt* (publié à l'origine sous le titre de *The World the Children Made*), Indianapolis, The Saturday Evening Post, 1950

GIBSON William, *Neuromancer*, New York, Ace, 1984

IV. BIBLIOGRAPHIE

GIBSON William, *Count Zero*, New York, Ace, 1985

GIBSON William, *Mona Lisa Overdrive*, New York, Victor Gollancz Ltd, 1986

Philosophie et Sociologie

BAUDRILLARD Jean, *Simulacres et Simulation*, Paris, éditions Galilée, collection Débats, 1985

BAUDRILLARD Jean, *Vérité ou Radicalité de l'Architecture ?*, Paris, Sens & Tonka, 2013

CHATELET Gilles, *L'enchantement du Virtuel*, texte rédigé d'après l'exposé du 3 juin 1986 au Collège International de Philosophie

DEBORD Guy, *Commentaires sur la Société du Spectacle*, Paris, éd Gérard Lebovici, 1988

DEBORD Guy, *La Société du Spectacle*, Paris, Buchet/Chastel, 1967

DELEUZE Gilles, *Dialogues*, Paris, Flammarion, 1996

DIODATO Roberto, *Esthétique du Virtuel*, Italie, Éditions Bruno Mondadori, 2005

LEVY Pierre, *Qu'est-ce Que le Virtuel ?*, Paris, Éditions de la Découverte, 1995

MARTIN Jean-Clet, *L'image Virtuelle. Essai Sur la Construction du Monde*, Paris, éditions Kimé, 1996

MERLEAU-PONTY Maurice, *Le Visible et l'Invisible*, Paris, Gallimard, Bibliothèque des idées, 1964

MOREL Philippe, *Le Capitalisme Intégral. Integra®*, Non publié, 2002

QUEAU Philippe, *Le Virtuel. Vertus et Vertiges*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, collection milieux, 1993

Réalité Virtuelle

HAYLES N. Katherine, *How We Became Posthuman. Virtual Bodies In Cybernetics, Literature, And Informatics*, Chicago, The University of Chicago Press, 1999

HEIM Michael, *The Metaphysics of Virtual Reality*, Oxford, Oxford University Press, 1993

MILON Alain, *La Réalité Virtuelle. Avec ou Sans le Corps ?*, Paris, Autrement, collection Le corps plus que jamais, 2005

IV. BIBLIOGRAPHIE

MITCHELL William J., *City Of Bits. Space, Place, And The Infobahn*, Cambridge, The MIT Press, 1996

NEGROPONTE Nicholas, *Being Digital*, New York, First Vintage Books, 1996

RHEINGOLD Howard, *La Réalité Virtuelle. Quand l'illusion a Toutes les Apparences de la Réalité*, Paris, Éditions Dunod, 1993

SUTHERLAND Ivan, *The Ultimate Display*, Proceedings of the IFIP (International Information Security Conference) Congress, 1965

WOOLLEY Benjamin, *Virtual Worlds*, Oxford, Wiley-Blackwell, 1992

