

Réalisme des constructions dans les jeux vidéo

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Doit-on bannir Minecraft ?

Clément DESODT - Marc VACHER

Édité le
19/04/2021

école
normale
supérieure
paris-saclay

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Marc Vacher, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

L'essor vertigineux des jeux vidéo ces vingt dernières années s'est effectué grâce à une technologie informatique toujours plus performante. La puissance de calcul et la qualité graphique ne cesse de progresser, permettant aux utilisateurs et aux créateurs de dépasser les limites de leur imagination. La réalité virtuelle, dernière invention majeure, a pour objectif de délivrer une expérience la plus immersive possible. De plus, l'accès progressif à une connexion internet de meilleure qualité a permis aux utilisateurs et créateurs du monde entier de se rejoindre et de partager du contenu.

Dans le même temps et pour les mêmes raisons évoquées précédemment, de nombreux logiciels de CAO de conception de bâtiment tels *ArchicAD* [1] ou *Revit* [2] ont révolutionné le métier du génie civil et de l'architecture. Le BIM (Building Information Modeling) permet désormais à tous les corps de métiers de se rassembler autour d'un même outil numérique, améliorant les stratégies de conception des ouvrages.



Figure 1 : Rendu du nouveau bâtiment de l'ENS Paris-Saclay sous Revit, source Autodesk France [3]

Ces deux domaines devaient se rejoindre logiquement en un point : les jeux vidéo de construction. Ils en existent des milliers et ils sont très populaires, toutes tranches d'âge confondues. Cependant aucun n'a le succès d'un des jeux vidéo les plus célèbres : *Minecraft*. Et pourtant, ce jeu se base sur des graphismes les plus simplistes qui soient. Le réalisme est moindre, surtout lorsque que l'on compare aux dernières sorties des jeux vidéo et à la réalité

virtuelle. Cela l'éloigne beaucoup d'un logiciel d'architecture à première vue. Ce jeu de création mondialement connu est cependant utilisé dans différents projets de construction, qu'ils soient professionnels ou éducatifs.



Figure 2 : Exemple d'architecture classique sur Minecraft, source M. Vacher (15/03/2015)

Cette ressource a pour but de comprendre comment les jeux vidéo en général peuvent constituer une approche architecturale intéressante dans le cadre d'un projet et/ou d'une ressource éducative. Les avantages et les inconvénients que présentent ces jeux du point de vue de la construction et de l'aspect scientifique en génie civil seront abordés. Le cas particulier de *Minecraft* sera analysé à titre d'étude de cas.

1 – Étude du réalisme dans les jeux vidéo et état de l'art des jeux vidéo de construction

Le réalisme d'un jeu vidéo est caractérisé par la qualité de ses graphismes, sa capacité d'immersion, son « *gameplay* » (dynamique de jeu) principalement. Tous ces paramètres sont ce qui fait la qualité et le succès d'un jeu vidéo. Le réalisme d'un jeu nécessite de nombreuses heures de travail : travail d'archives pour les reconstitutions historiques, modélisations dynamiques pour les effets spéciaux... La réalité de l'environnement doit obéir à une physique cohérente, pour donner la sensation d'immersion, que ce soit dans une reproduction du réel ou d'un univers fantastique. Ces éléments de réalisme parlent aux sens des joueurs, dont le cerveau identifie et associe ces éléments à ce qu'il connaît.

1.1 - Architecture dans les jeux vidéo : étude de cas

De nombreux jeux vidéo basent leur succès sur des environnements recherchés, surtout d'un point de vue historique et réaliste, en se basant sur un travail d'archive remarquable. Les technologies du BIM sont de plus en plus utilisées pour permettre aux *game designers* de travailler ensemble intelligemment sur l'environnement des jeux [4]. Le *BIM* est un processus de travail collaboratif dans lequel des maquettes numériques sont produites par des maîtrises d'œuvres et des entreprises (bureau d'ingénieurs, paysagistes, coordinateurs, etc.). Ainsi, la « dynamique » des bâtiments pour les explosions et autres effondrements en ruines que les joueurs aiment tant sont scrupuleusement modélisés pour représenter le plus précisément possible comment cela se produirait en réalité.

Un des exemples les plus connus reste celui d'*Assassin's Creed* [5], la série de jeux vidéo historique d'action- aventure et d'infiltration en monde ouvert, développée et éditée par *Ubisoft* [6]. L'avantage de cette licence est qu'elle a traversé plus d'une décennie, ce qui permet de suivre l'évolution du soin apporté au réalisme des jeux.



Figure 3 : Vue du jeu *Assassin's Creed Unity*, source Hitek [7]

Dans *Assassin's Creed*, le joueur incarne un assassin dans différentes époques : voyage, fuite, infiltration prennent place dans des décors historiques de l'antiquité, de la renaissance ou de la révolution industrielle. Pour réaliser une course-poursuite sur les toits de Londres du XVIII^e siècle ou dans les antichambres de Venise au XV^e, les développeurs de chez *Ubisoft* ont dû étudier l'architecture de ces différentes époques avec précision et avoir recours aux archives municipales.

La modélisation de Notre-Dame-de-Paris pour le jeu *Assassin's Creed Unity* [8] a nécessité plus de 5 000 heures de développement, soit 14 mois de travail [9]. En s'appuyant sur de multiples plans, documents, gravures d'époques et autres descriptions présentes dans les livres, l'équipe très fournie qui s'est chargée de reconstituer la ville de Paris à l'époque de la Révolution Française, a pu recréer une ambiance et des détails extrêmement fidèles. Rien n'est laissé au hasard puisque le joueur peut accéder partout, et même escalader Notre-Dame pour monter tout en haut sur la flèche. Si les ingénieurs qui travaillent aujourd'hui sur la reconstruction de Notre-Dame après l'incendie du printemps 2019 ne pourront directement s'aider du jeu en lui-même, certaines analyses utilisées pour la modélisation de la cathédrale seront utiles à sa reconstruction [10].

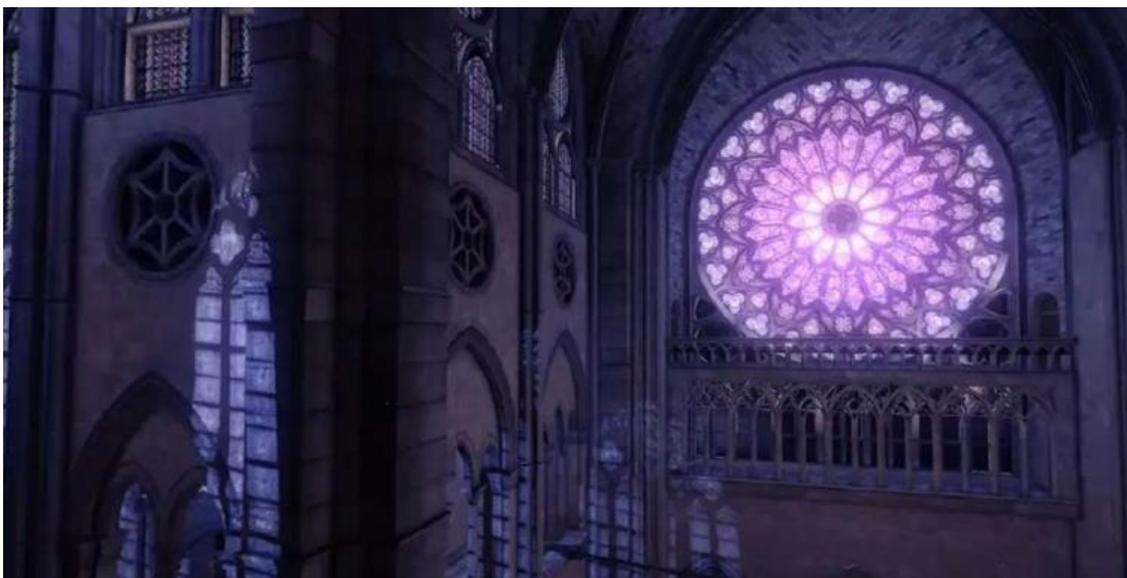


Figure 4 : Vue de l'intérieur de la cathédrale Notre-Dame au XVIII^e siècle, source Ubisoft [8]

Outre la science, ce jeu sert également pour la culture. Toujours dans *Assassin's Creed Unity* les joueurs peuvent explorer la Halle au blé [13]. Ce bâtiment, désormais appelé Bourse de Commerce et actuellement en pleine rénovation, et *Ubisoft* permet que la visite de ce monument soit toujours disponible en virtuel pendant les travaux.

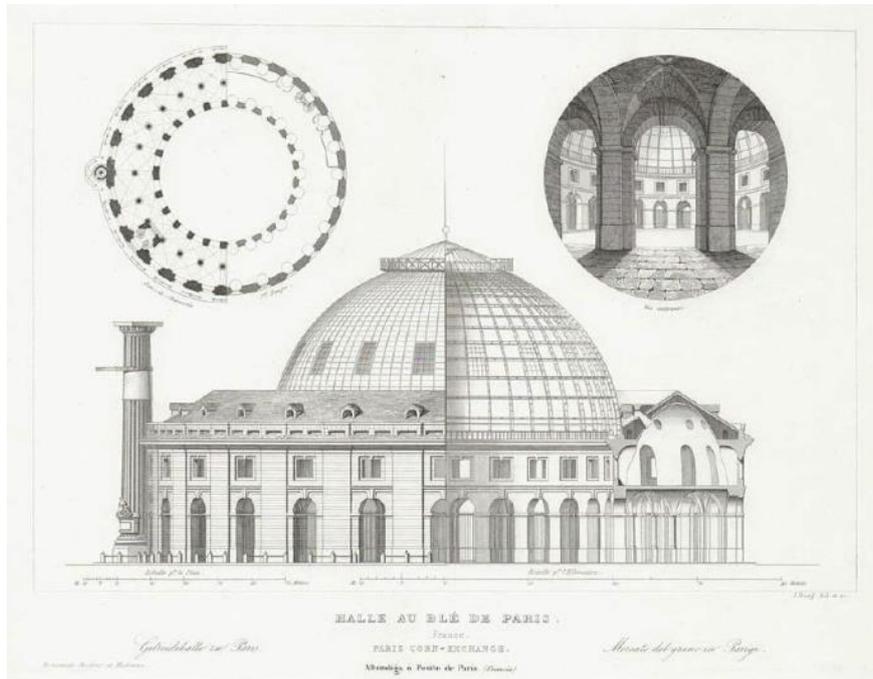


Figure 8 : Plan en coupe de la Halle au Blé, source J. Bury (1853) [14]



Figure 9 : Reproduction dans *Assassin's Creed Unity*, améliorée à la demande de la Bourse de Commerce, source *Ubisoft Stories* [13]

Les mêmes technologies qui servent au jeu vidéo s'appliquent aujourd'hui au métier de l'architecte et vice-versa : BIM, drones, réalité augmentée servent à reproduire la réalité où à l'imaginer du mieux possible.

1.2 - État de l'art des jeux vidéo de construction

Si tout jeu vidéo doit soigner le réalisme de ses graphismes et de sa dynamique de jeu, c'est encore plus vrai pour les jeux vidéo de construction. Ceux-ci sont très appréciés des joueurs et nous allons nous intéresser à leur réalisme en comparaison à la réalité. Les jeux vidéo de construction peuvent prendre des formes diverses et variées : certains jeux traitent du *monde de la construction*, d'autres sont des jeux où *l'on construit* à proprement parler. Voici un état de l'art résumant les principales catégories et spécificités des jeux vidéo de construction.

1.2.1 - Planification et Génie urbain

Les premiers jeux vidéo liés de près ou de loin à la construction qui sont apparus sont les jeux de planification urbaine. Le plus connus reste aujourd'hui *Sim City* [15]. *Sim City* est une série de jeux vidéo débutée par Will Wright en 1989 pour le compte de la société *Maxis*. Ils mettent en scène des jeux de gestion permettant de créer et modifier des villes. Il faut s'occuper de la création des différentes zones (résidentielles, commerciales et industrielles), de la distribution d'électricité, d'eau, de la construction des routes, écoles, hôpitaux, réseaux de transports en commun ou encore de la gestion du budget municipal.



Figure 10 : Vue de *Sim City*, source *Urbanews* [16]

Cependant le jeu ne fait pas l'unanimité chez les urbanistes, critiquant le manque de réalisme quant à la gestion réelle (*Sim City* serait la démonstration d'une « philosophie du toujours plus ») et aux multiples contraintes qui ne sont pas présentes dans le jeu. En effet, la gestion est très orientée, soit vers l'industrie, soit vers la culture et le tourisme, sans prendre en compte les liens et les contraintes que la cohabitation des deux implique dans la réalité [16]. D'un point de vue architectural, il s'agit souvent de l'époque moderne qui est « designée », et il n'y a pas de liberté laissée au joueur.

Sim City a inspiré de nombreux autres jeux de gestion, tel *Cities XL* ou *Cities Skyline*, mais l'ensemble de ces jeux souffrent de la même critique : leur trop grande facilité/simplicité face à la réalité du génie urbain. Et en même temps, est-ce réellement l'objectif de reproduire l'ensemble des contraintes du génie urbain et de la planification pour un jeu ?



Figure 11 : Vue de *Cities Skyline*, source *MacGames* [17]

1.2.2 - Simulateurs

Dans la même série que les jeux vidéo de planification urbaine, il existe des jeux de « simulation » de construction, qui sont arrivés sur le marché peu après 2010, et qui suivent le même schéma. La plupart des licences propose un *gameplay* qui repose sur la gestion d'une entreprise de construction. L'idée est donc de faire grandir cette entreprise en gagnant de nouveaux contrats et en accomplissant des chantiers.

Si les chantiers se déroulent globalement de la même manière que dans la réalité, ce n'est pas sur ce point-ci que le jeu insiste. De plus l'aspect « définition du projet » avec discussions entre les différents intervenants, réalisation d'avant-projet, est souvent éclipsé. Ces types de jeu se focalisent plus sur la gestion financières des chantiers, avec achats des matières premières et versement des salaires des employés d'une part, et gain de part de marché de l'autre, sans se préoccuper de la partie architecture ou conception d'ingénierie. Ces jeux sont appelés « *simulateur* » car une majeure partie du *gameplay* est focalisé sur le maniement d'engin sur les chantiers [18].



Figure 12 : Pochette du jeu Construction Simulator3, source Astragon [19]

1.2.3 - Jeux « indé » (jeux indépendants)

En ce qui concerne les jeux de construction à proprement parler (non pas jeux à propos du monde de la construction mais jeux où l'on construit), ce sont principalement des jeux indépendants, bien moins longs et avec souvent moins de moyens. Cependant il s'agit de jeux simples de prise en mains, addictifs et très appréciés des joueurs justement pour cela. La possibilité d'y jouer instantanément a beaucoup influencé les plateformes de distributions de ces jeux indépendants de construction : ils sont beaucoup téléchargés sur portable.

Un des types de jeux les plus appréciés, téléchargés, et déclinés sont les jeux types « *Bridge Constructor* ». L'idée est de construire un pont solide au-dessus de l'eau ou du vide pour autoriser le passage de circulation plus ou moins importante. La physique des véhicules, leur taille et surtout leur poids va jouer dans la tenue du pont construit, qui peut d'ailleurs être fait de différentes façons et avec différentes matières : bois, acier, câble, corde, etc. Chaque niveau est différent : possibilités de construction de piles de pont, portée plus ou moins longue, matériaux différents, ponts haubanés, ponts suspendus... Il existe de nombreux jeux avec le même principe que *Bridge Constructor* : *PolyBridge*, *Poly : Constructor* [20]...



Figure 13 : Aperçu du jeu PolyBridge, source lphon.fr [20]

Il peut être intéressant de se poser la question de la réalité physique de ce genre de jeu. L'importance du réalisme et de son impact sur l'utilisateur/joueur est un sujet très étudié, notamment pour les FPS (« *First Person Shooter* »). Nous pouvons essayer de réaliser le même genre d'étude pour les jeux de construction : ce test est réalisé dans la partie 1.3.2.

1.2.4 - Serious Games

Une autre approche des jeux vidéo en rapport avec la construction sont les *serious games*. Les *serious games* sont des jeux dont l'aspect ludique est utilisé pour un autre objectif que le pur divertissement. Ils sont souvent utilisés voir développés par les entreprises pour des séminaires afin d'introduire de nouveaux concepts à leurs équipes, d'inciter au travail coopératif. De manière synthétique, un « jeu sérieux » englobe tous les jeux de société, jeux de rôle et jeux vidéo qui s'écartent du seul divertissement. Si le secteur industriel de la construction n'est pas un des secteurs où les *serious games* sont le plus utilisés (ils sont généralement plus utilisés pour les managers, cadres, avec des métiers de gestion), il en existe tout de même quelques-uns. Ceux-ci ne sont pas des jeux de constructions, mais ils permettent d'aborder des problématiques appartenant à la réalité des personnes travaillant dans le BTP par exemple [21]. C'est l'exemple du jeu *Premiers combats*, qui a pour but la prévention de la consommation d'alcool sur les chantiers.



Figure 14 : *The Evolution of Trust* : serious game le plus célèbre pour apprendre les mécanismes de la coopération, source Serious-Games.fr [22]

Il existe aussi le jeu *Ambassadors*, qui se base sur la même dynamique que *Sim City*, et dont l'objectif est l'intégration des salariés en leur inculquant les valeurs de l'entreprise Suez,

entreprise commanditaire du jeu. Il permet aux joueurs de mettre virtuellement en pratique les douze engagements du groupe envers le développement durable comme la valorisation des déchets ou l'efficacité énergétique des installations. Entre les *serious games* et l'utilisation des jeux vidéo pour la pédagogie, il n'y a qu'un pas.

1.3 - Utilisation des jeux vidéo pour la pédagogie scientifique

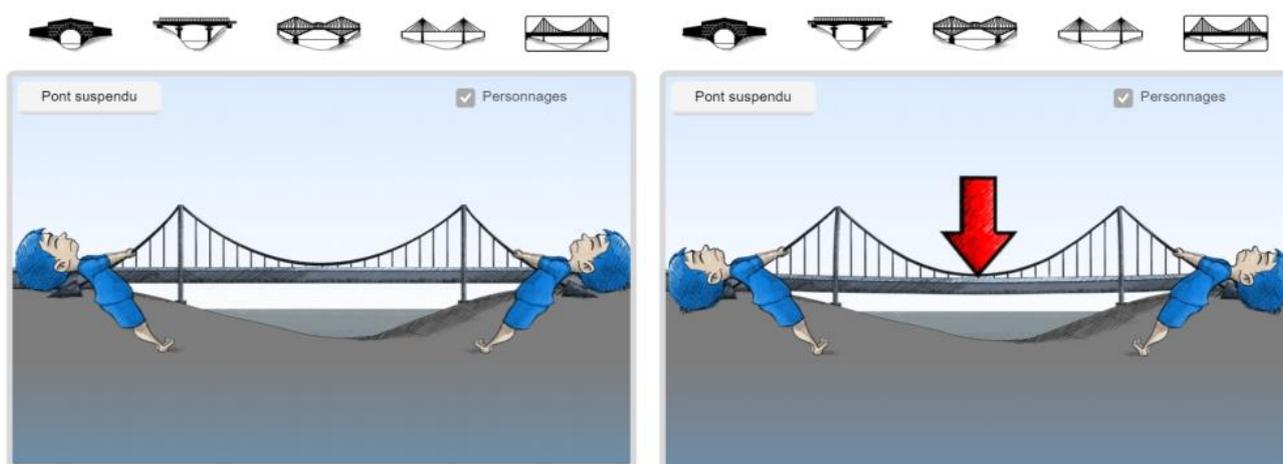
1.3.1 - Exemples de projets pédagogiques

Même si les jeux vidéo sont de plus en plus appréciés des adultes, les enfants/adolescents restent le public majoritaire, ainsi l'impact, en général, des jeux vidéo sur les plus jeunes est un sujet très étudié depuis plus d'une décennie. D'une manière générale, les jeux vidéo pédagogiques ont l'avantage d'être très bien perçus par les élèves qui, par ailleurs, maîtrisent déjà souvent ce média de par leur pratique des jeux. L'utilisation des jeux vidéo dans le cadre scolaire semble ici avoir eu un impact positif sur leur motivation, leur comportement et leur attention. En apportant une dimension ludique, les enfants retiennent plus facilement les informations véhiculées par le jeu, d'autant plus si celui-ci combine informations visuelles et auditives. En complément des outils pédagogiques traditionnels, le jeu vidéo semble donc favoriser une transmission plus efficace d'un certain nombre de savoirs.

Les jeux de constructions "classique" (*Lego*, *Kapla*) sont très réputés pour l'éveil éducatif. À partir de ce constat, des jeux vidéo de construction peuvent être utilisés à des fins pédagogiques, des petites classes jusqu'au lycée, ils permettent à la fois d'expliquer des principes de construction (types de ponts, principes de liaison comme le béton armé, ...) ou totalement autre chose, comme le fonctionnement des cellules en biologie par exemple. Ainsi, la portée pédagogique des jeux vidéo et de leurs constructions n'est plus en arrière-plan (comme le contexte historique et l'architecture d'époque sert de *background* à l'expérience de jeu dans *Assassin's Creed*), mais devient un objectif premier. Cependant, le nombre de jeu et leur accessibilité restent limités : les jeux vidéo pédagogiques de mathématiques et de réflexions/stratégie restent beaucoup plus plébiscités.

On peut tout de même s'intéresser à l'enseignement de la technologie dans les classes de 6ème et 5ème, avec une introduction aux constructions en treillis et une revue des différentes technologies de construction de ponts. Cela fait partie des enseignements « Habitat et Ouvrage » et « Structure et Matériau » du programme de technologie en vigueur depuis 2016 [23].

On peut trouver des animations interactives expliquant les principes de structure des ponts suspendus, à haubans, cantilever... [24]



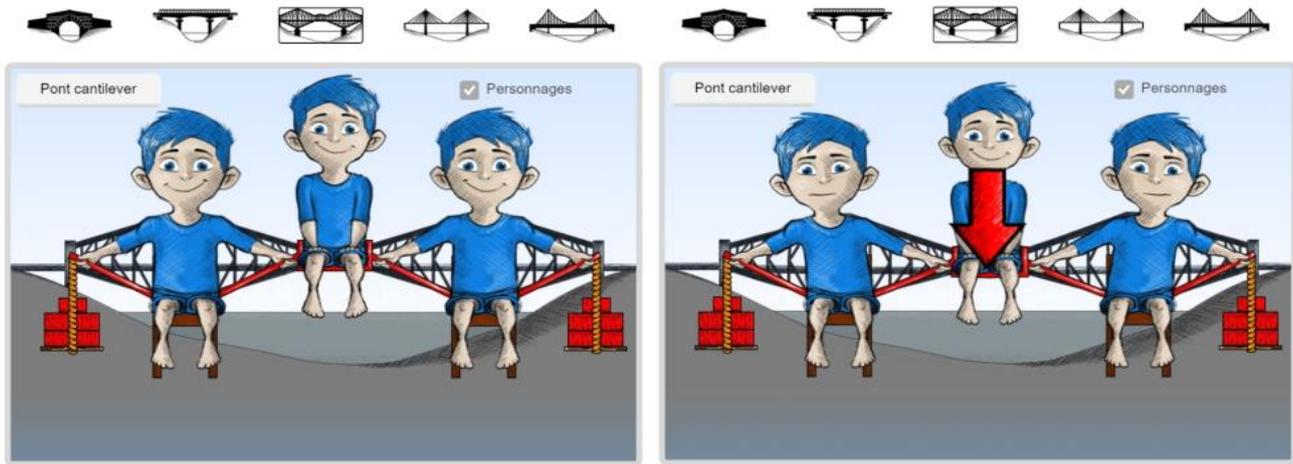


Figure 16 : Animation d'explication du fonctionnement du pont cantilever, source Edumedia-sciences [24]

Ici, il ne s'agit encore que d'animations, on ne peut pas encore parler de véritable jeu vidéo. Dans la même lignée que *PolyBridge* et *Bridge Constructor*, mais avec une visée pédagogique plus marquée, on retrouve le jeu *Bridge Building Game* [25]. Il s'agit d'un logiciel gratuit de construction et de simulation de ponts, réalisé par Alex Austin, un professeur de technologie anglais. Cette application a été partiellement traduite par Julien Delmas en février 2009. Le graphisme du jeu n'est pas exceptionnel, mais il a l'avantage d'être gratuit, simple d'utilisation et de proposer une modélisation 1D amplement suffisante (visualisation des efforts, dynamique de rupture, ...) pour des élèves de 5ème. Il possède de plus un éditeur de niveaux qui permet de construire son propre niveau puis d'essayer de construire le pont approprié ensuite !

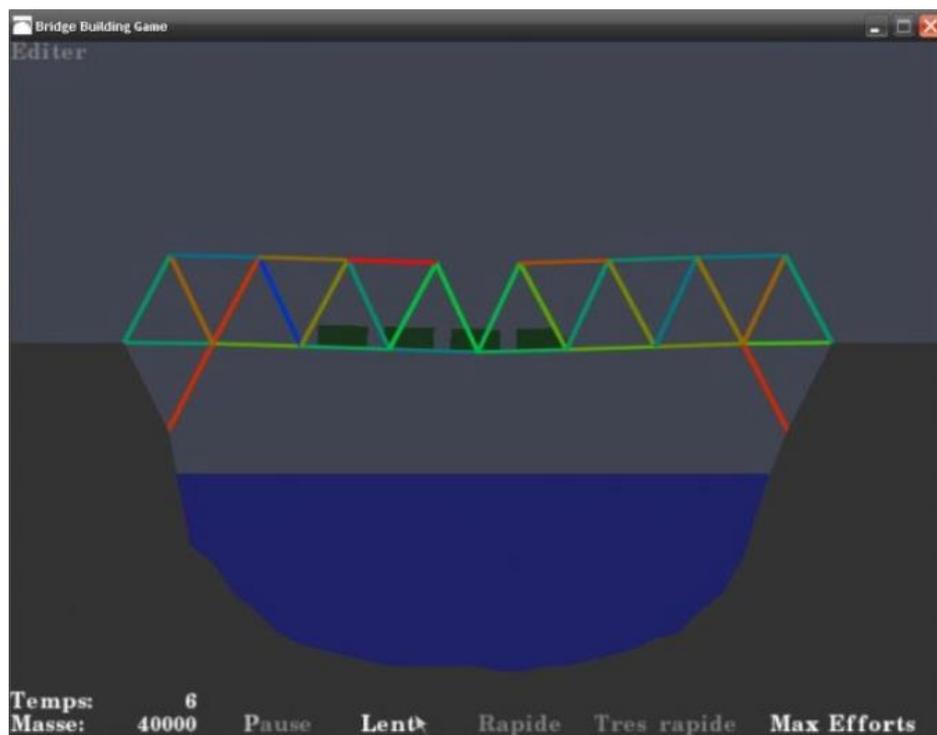


Figure 17 : Bridge Building Game, source Académie de Versailles [25]

Que vaut la modélisation de ce type de jeu par rapport à un logiciel de conception d'ingénieur comme *Robot Structural Analysis* [26] par exemple ? On peut essayer de comparer pour un exemple simple. L'idée est de traverser cette rivière, sachant que quatre points d'ancrage sur les rives sont disponibles. Un élève de 5ème pourrait très bien proposer ce type de pont (figure 17) après le cours de son professeur de technologie sur le sujet. On peut déjà apprécier la similitude entre l'interface du jeu et celle de *Robot Structural Analysis*. Dans les deux cas un repère

cartésien est mis à disposition et l'utilisateur crée des *nœuds* et des *barres* qui constituent le pont. On peut donc refaire ce dernier dans *Robot Structural Analysis* (figure 18), en articulant chaque barre entre-elles. Comme dans le jeu, le tablier est modélisé de façon discontinue.

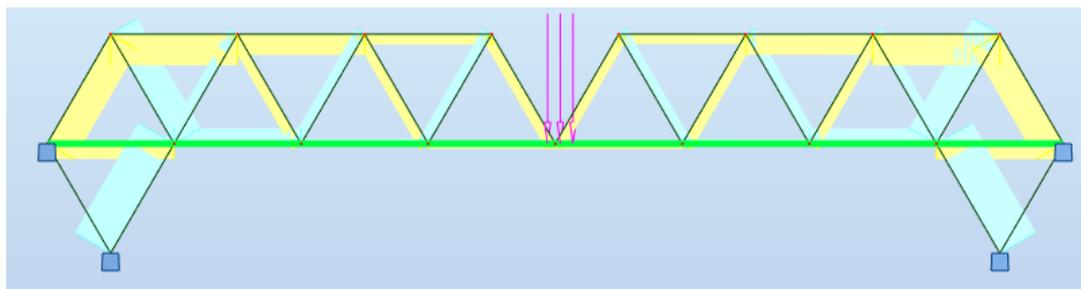


Figure 18 : Modélisation n°1 : barres souples

On peut alors comparer les contraintes axiales présentes dans les barres. On peut voir que le treillis est très sollicité sur les extrémités, et moins au centre. Cela semble contredire la représentation du jeu : le code couleur « rouge » indique une sollicitation importante au centre du treillis là où les extrémités, en « bleu-vert », le sont moins.

Il faut alors tenir compte de certaines hypothèses adoptées. Premièrement les charges sont reportées sur tous les nœuds (ce qui revient à considérer une rigidité flexionnelle infinie pour les éléments du tablier). Cette hypothèse n'est pas adoptée dans les ouvrages réels, où la continuité du tablier et sa rigidité flexionnelle est prise en compte. La répartition des contraintes axiales changent, et on retrouve globalement ce que le jeu affiche (figure 20).

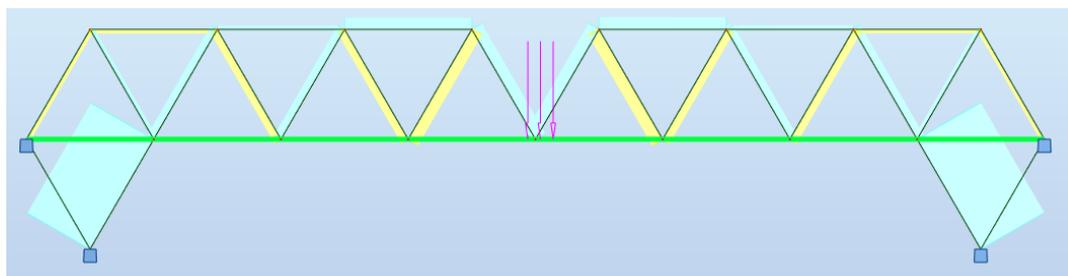


Figure 19 : Modélisation n°2 : barres infiniment rigides

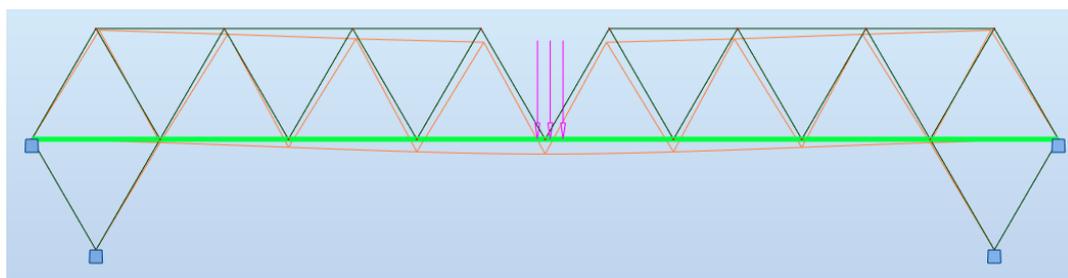


Figure 20 : Modélisation n°2 : déformée globale

Deuxièmement, le jeu propose des résistances en compression et traction identiques. Les phénomènes d'instabilités (flambement, déversement, etc.) sont négligés ce qui est fortement irréaliste au vu de l'élanement des barres. Ces phénomènes pourraient être expliqués dans un second temps aux élèves.

La physique de ce genre de jeu, sur des cas simples en tout cas, reste donc relativement réaliste, suffisamment pour bien représenter à des classes de collège les principes de construction des ponts.

1.4 - Un cas particulier : Minecraft

Le jeu *Minecraft* est un jeu très particulier à étudier et fait partie des exceptions qui vont à l'encontre des principes de réalisme énoncés plus tôt. Pourtant il dépasse de loin, de par sa renommée ou son utilisation pédagogique, tout autre jeu vidéo. Vendu à plus de 154 millions d'exemplaires, le titre racheté en 2014 par *Microsoft* a marqué l'histoire du jeu vidéo par ses mécaniques, visionnaires à l'époque.

1.4.1 - Présentation et historique du jeu

Minecraft est un jeu développé par la studio *Mojang*, société créée par le développeur suédois Markus Persson, surnommé « Notch », créateur de *Minecraft* . Il publie la première version de *Minecraft*, jeu de construction basé sur un monde cubique. Il est très rudimentaire à ses débuts - il s'agit essentiellement de poser des *blocks* les uns sur les autres pour bâtir des structures. Au-delà de l'aspect « *Lego* », c'est aussi un monde ouvert et presque infini, généré de manière procédurale par l'ordinateur, avec un algorithme qui détermine le terrain, le climat, le relief et la vie animale de chaque parcelle du monde généré.



Figure 21 : Page d'accueil de lancement du jeu

La mécanique centrale du jeu est la possibilité d'utiliser des matériaux pour « *crafter* », c'est-à-dire fabriquer des objets. Le joueur dispose d'une grille sur laquelle il doit mettre les matériaux dans le bon ordre pour obtenir un objet : un bâton sous un morceau de charbon pour fabriquer une torche, un bâton surmonté de deux planches de bois pour une épée en bois, etc. Le personnage incarné par le joueur, lui aussi cubique, possède une jauge de vie ainsi qu'une jauge de nourriture. Si sa barre de vie atteint 0, le joueur ressuscite à son emplacement de départ sur la carte ou à côté du dernier lit dans lequel il a dormi. Le monde est peuplé de monstres comme les « *squelettes archés* », les « *zombies* » ou encore les « *creepers* » (des petites bêtes vertes qui explosent !).



Figure 22 : Creeper dans une partie Minecraft et capture d'écran du jeu

L'introduction de la *redstone*, un matériau supposément conducteur dans le jeu, va permettre de faire des circuits logiques. Certains joueurs iront carrément jusqu'à reproduire des calculatrices scientifiques capables de résoudre des opérations d'intégrations complexes dans le jeu !

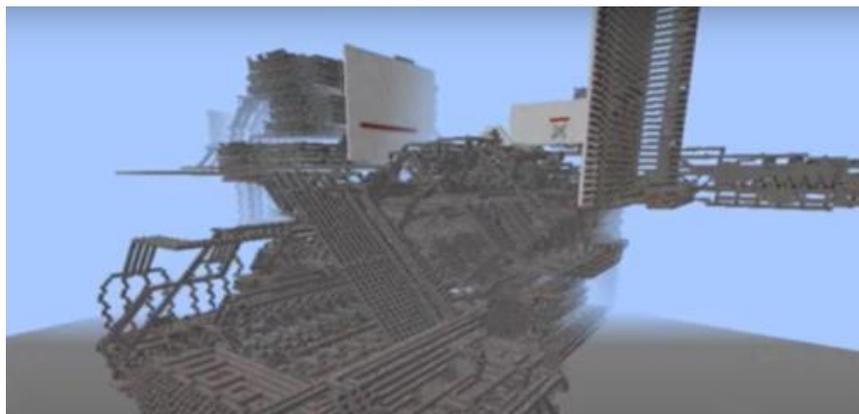


Figure 24 : Calculatrices scientifique reproduite par un joueur dans *Minecraft*, source *Le Monde* [28]

Dans le monde entier la recette prend. La simplicité du concept et les possibilités sans limites ont conquis les joueurs à travers le monde : *Minecraft* est un succès. Le petit jeu indépendant est devenu un mastodonte : le 15 septembre 2014, *Microsoft* confirme qu'il va racheter le studio *Mojang*, éditeur de *Minecraft*, pour 2,5 milliards de dollars (1,933 milliard d'euros). C'est alors l'un des jeux les plus populaires de la planète, ayant fait naître de nombreuses chaînes YouTube consacrées aux différents aspects de *Minecraft*. L'été 2016, *Microsoft* annonce que *Minecraft* a franchi le palier des 100 millions d'exemplaires vendus, tous supports confondus. Aujourd'hui, le nombre de vente est estimé à plus du double, ce qui en fait le jeu le plus vendu de tous les temps, devant ... *Tetris*.

Concernant son lien avec la construction, c'est très simple. On peut s'accorder à dire qu'il n'y a pas un seul monument connu qui n'ait pas été reproduit sous *Minecraft* : cathédrales, pyramides, stades, ... et tout cela avec une précision parfois déconcertante, quand on sait que cela est fait avec des *blocks* (figures 25 et 26).



Figure 25 : La Cathédrale Notre-Dame de Paris et le Taj Mahal



Figure 26 : La Pyramide de Kheops et la Skyline de Manhattan

1.4.2 - Gameplay : la physique minimaliste de *Minecraft*

Le monde de *Minecraft* obéit à des règles élémentaires qui décrivent les comportements de tous les éléments du jeu. Lorsque l'on lance une partie, le jeu génère une *map* dans un repère cartésien (évidemment). L'unité de mesure est le *block*. La taille standard d'une *map Minecraft* a évolué avec le temps : elle est passée de 256 x 256 x 64 dans la version alpha à 30000000 x 256 x 30000000 dans la version 1.8 ! [29] Soit une surface, si 1 *block* \Leftrightarrow 1 m, de 9 x 10⁸ km², soit 1,75 fois la surface de la Terre !

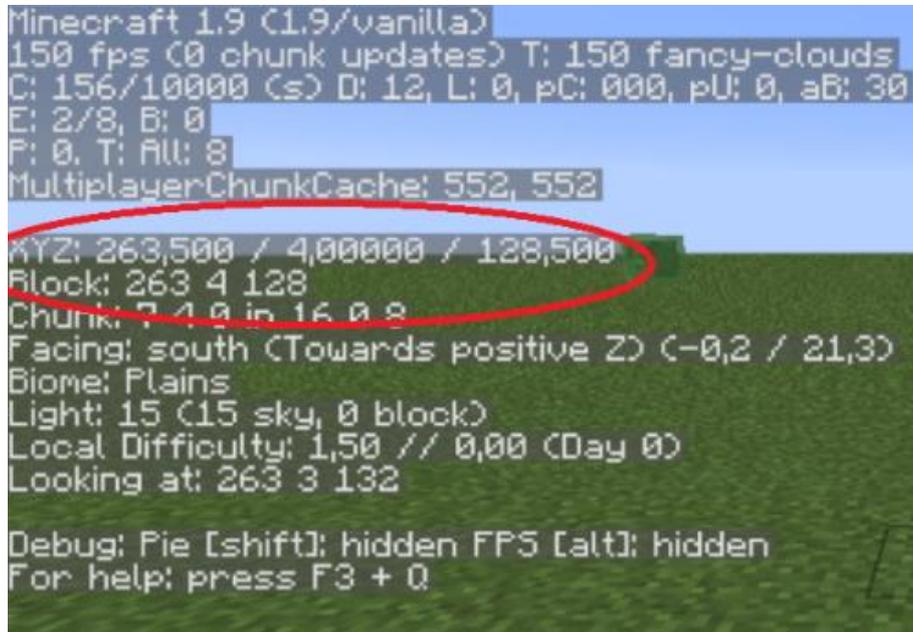


Figure 27 : Repère cartésien de *Minecraft* sur l'écran de débogage, source M. Vacher

La version 1.8 est la dernière à avoir une surface finie, les versions suivantes intègre une génération de la carte au fur et à mesure de l'avancée du personnage en théorie infinie (en pratique, de par la mémoire consommée, la surface maximale générée avant que le jeu cesse de fonctionner correctement est estimée à ... 8 fois la superficie de la Terre, soit 4.08 x 10⁹ km²).

Les éléments de *Minecraft* sont répartis en deux catégories : les *blocks* et les entités. Si un *block* est immobile, avec ses informations totalement contenues par son voxel, une entité est par opposition dynamique. Sa position ne peut pas toujours être un nombre entier de *block* dans le repère cartésien. Toutes les entités ont les attributs suivants [30] :

- Une position, une vitesse, une orientation (tridimensionnelle) ;
- Un volume spécifique qu'elles occupent, qui consiste en une boîte tridimensionnelle de dimensions fixes (carrées vues de dessus), qui se déplacent dans l'espace.

On remarque donc que seuls les mouvements de corps solides sont pris en compte dans *Minecraft*. Les déformations ne sont pas modélisées, ce qui semble être totalement incompatible avec le calcul de structure en génie civil. La physique dans *Minecraft* peut se découper en trois domaines [30] :

- Solides ;
- Fluides ;
- Électricité (avec la *redstone*).

Physique des « solides » : La physique des solides est extrêmement limitée. En plus de ne pas considérer les déformations de la matière, seuls très peu de *blocks* sont soumis ... à la gravité. En

effet seuls les *blocks* de sable, de gravier et de béton en poudre y sont soumis. Autrement, tous les autres *blocks* peuvent léviter ! [31]

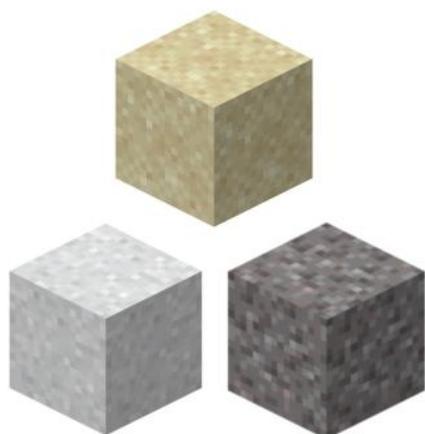


Figure 28 : *Blocks* soumis à la gravité, source MinecraftWiki [31]



Figure 29 : Illustration de la gravité, source M. Vacher

Physique des « Fluides » : Il y a actuellement deux types de liquides dans *Minecraft*, la lave et l'eau. La physique des fluides est également simpliste dans *Minecraft*. Chaque *block* rempli par un fluide possède un « niveau de remplissage ». Celui-ci est de 0 pour les *blocks* source et le niveau maximum dépend du type de fluide (7 pour l'eau, 3 pour la lave). Plus la distance est éloignée de la source, plus cette valeur augmente. Ainsi, une valeur haute correspond en fait à un faible niveau d'eau.

Le remplissage des *blocks* se fait alors par processus de mise à jour par pas de temps, en suivant un algorithme de *pathfinding* : le *pathfinding*, permet qu'une entité aille d'un point « A » vers un point « B » de la manière la plus rapide et en prenant en compte les 'obstacles' [32]. Dans *Minecraft*, l'algorithme utilisé est l'algorithme A*, qui est une extension du célèbre algorithme de Dijkstra.

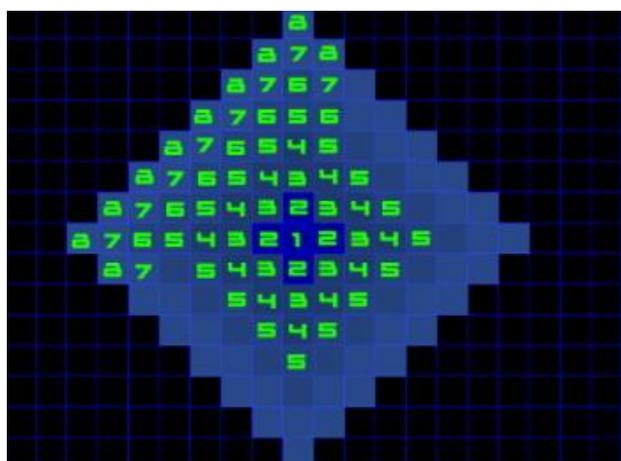


Figure 30 : Dispersion de l'eau et *pathfinding* : sans obstacle, source Le Comptoir du Clickeur [32]

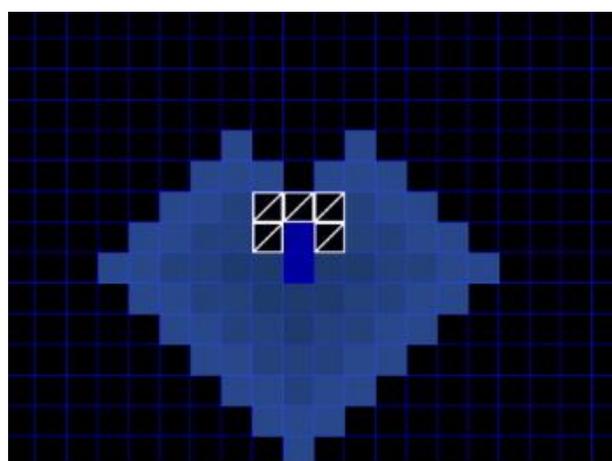


Figure 31 : Dispersion de l'eau et *pathfinding* : avec obstacle, source Le Comptoir du Clickeur [32]

L'infiltration et l'écoulement en milieux poreux est également représenté, même s'il ne s'agit que d'un élément graphique. Tout *block* situé juste sous un fluide (eau ou lave) laisse tomber des gouttes de ce fluide. Ces gouttes n'ont aucun effet et ne peuvent pas être ramassées mais elles sont très pratiques pour savoir si un fluide est placé au-dessus du *block* que l'on mine [30].

Physique de « l'électricité » : Comme expliqué plus haut, on peut former des circuits logiques grâce à la *redstone*. Initialement, les câbles de *redstone* sont des outils utilisés pour la

conception de circuits permettant de connecter plusieurs objets entre eux (par exemple, un levier d'ouverture/fermeture avec une porte distante, ou encore une plaque de pression avec un distributeur de flèches pour constituer un piège). Comme expliqué précédemment, certains joueurs ont développé des circuits bien plus performants.

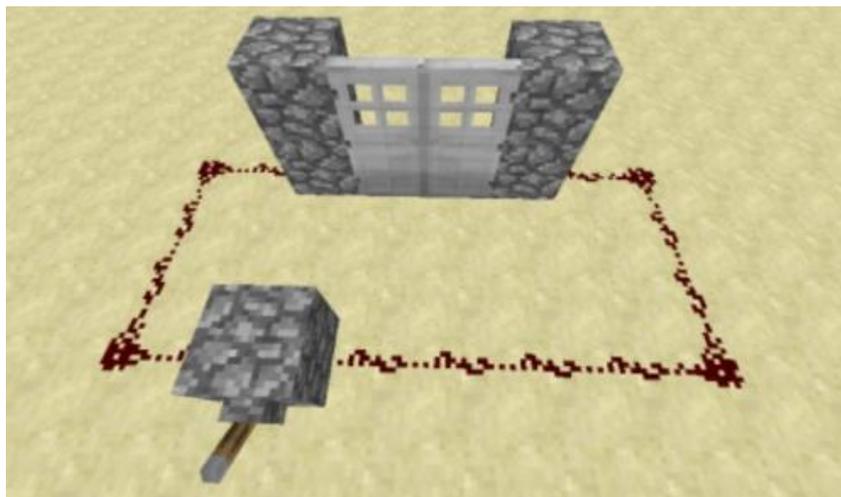


Figure 32 : Circuit simple de redstone : porte oui/non pour l'ouverture d'une entrée, source MinecraftWiki [33]

Comme on peut le constater, *Minecraft* a réussi à créer un environnement de construction architecturale intéressant et intelligent en se basant sur un ensemble de lois restreint, bien loin des dynamismes des derniers jeux vidéo qui peuvent sortir aujourd'hui en 2020. Avec des graphismes minimalistes mais une diversité importante et une totale liberté, de nombreux joueurs se sont lancés dans des constructions plus ou moins élaborées.

Il était donc légitime que *Minecraft* deviennent également un support pédagogique de premier choix.

1.4.3 - Une ressource éducative intéressante

De nombreuses utilisations de *Minecraft* se sont faites à tous les niveaux d'enseignement, assez rapidement après sa sortie. Si bien qu'en 2016, *Microsoft* sort une version *Minecraft : Education Edition* qui rassemble l'ensemble de ces projets. La version éducative de *Minecraft* a été conçue avec des enseignants afin de répondre à leurs attentes. Celle-ci est dotée de nombreuses fonctionnalités qui rendent *Minecraft* facile d'utilisation dans une salle de classe, l'objectif étant de faire du jeu un outil pédagogique et didactique. C'est ainsi que le jeu de construction le plus populaire devient un outil d'enseignement des mathématiques, la physique, mais aussi l'histoire et la biologie !



Figure 33 : Map Minecraft pour apprendre la classification périodique des éléments, source *Minecraft : Education Edition* [34]



Figure 34 : Map Minecraft pour apprendre la composition des cellules, source *Minecraft : Education Edition* [34]

De nombreux challenges et événements sont également organisés par la communauté, ce qui permet aux élèves de communiquer entre eux, de développer leur esprit critique, et d'être sensibilisés à des sujets de société comme la transition énergétique.



Figure 35 : Évènement Minecraft à l'occasion de la « journée de la Terre » (22/04/20), source Minecraft : Education Edition [34]

Les jeux vidéo semblent être une ressource éducative très utile, que le réalisme général du jeu soit poussé ou non. Ils permettent d'ouvrir de nouvelles manières d'aborder la construction, que ce soit dans le secteur industriel et les relations au travail, ou plus simplement l'ingénierie en génie civil. D'un point de vue architecture, il s'agit d'un outil indéniable d'introduction, même si on peut se poser la question de l'utilisation réelle de ces jeux vidéo dans des projets de construction.

2 – Différents projets mêlant architecture, génie civil et jeux vidéo

2.1 - Projets collaboratifs : BIM, POE et jeux vidéo

2.1.1 - La puissance des moteurs de jeux vidéo mis au service du BIM

Un des aspects qui fait des jeux vidéo un succès mondial est la possibilité de jouer en ligne. Via une connexion internet, les joueurs peuvent s'affronter ou collaborer autour de l'objectif du jeu. Cette possibilité de communication entre les utilisateurs permet le partage de savoirs, de connaissances et de données en général, menant souvent à la mise en place de projet commun.

Le parallèle avec le BIM est direct. Les maquettes numériques produites par des maîtrises d'œuvres et des entreprises (bureau d'ingénieurs, paysagistes, coordinateurs, etc.) sont ensuite rassemblées et mises en cohérence pour constituer une base de données intelligente afin de mener à bien le projet. Le BIM participe bien sûr à la construction mais il est aussi présent dans les processus d'utilisation et de maintenance du bâtiment (voire même la démolition !).

Lors de la conception d'un bâtiment, un très grand nombre de plan 2D sont dessinés par tous les intervenants, du cabinet d'architecte au chauffagiste. La modélisation 3D permet une représentation beaucoup plus impressionnante : celle-ci offre une plus grande facilité d'utilisation pour chacun que les conceptions 2D, qui doivent être redessinées à chaque changement. Le BIM permet donc la compilation et l'accès direct à toutes les informations. Au fur

et à mesure que les choses ont évolué, les moteurs de jeu vidéo ont fait leur apparition et ont offert aux entreprises BIM la possibilité de donner un aperçu des bâtiments très réaliste. Tout en présentant aux utilisateurs une multitude de nouvelles options disponibles, le rendu des environnements et des pièces s'est beaucoup amélioré. Un exemple concret est le moteur de jeu *Stingray* de *Autodesk*, entreprise leader dans la conception 3D d'ingénierie. Combiné au moteur de modélisation *3dsmax*, le module *Autodesk LIVE* permet une expérience d'immersion très prenante (figure 36) [35]. Il s'agit forcément d'un outil très utile pour la présentation des projets aux clients, potentiels ou non [36].

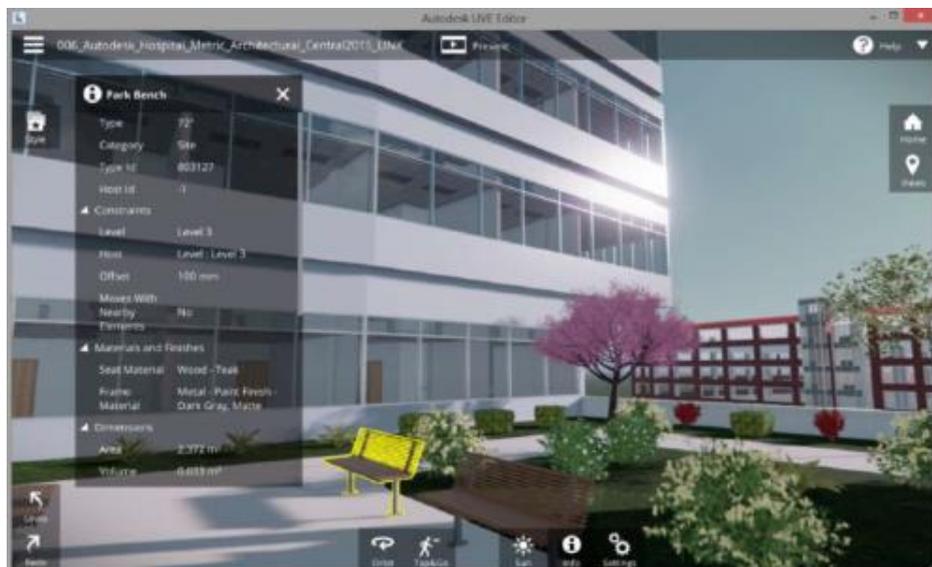


Figure 36 : Aperçu d'un extérieur d'hôpital sous Autodesk LIVE, source Engineering.com [35]

Ce logiciel intègre aussi une géolocalisation permettant d'avoir accès aux conditions climatiques et météorologiques, nécessaires pour concevoir le bâtiment. Ces informations sont utilisées dans la construction de la structure (charges variables de neiges ou de vents) que dans la conception des infrastructures assurant le confort des utilisateurs.



Figure 37 : Aperçu d'un bâtiment sous Autodesk LIVE, source Hexabim.com [37]

2.1.2 - Dynamique inspirée du jeu vidéo pour mise en place d'une POE

Évaluer les performances d'un bâtiment vis-à-vis des utilisateurs lors de son occupation est assurément un moyen efficace pour les clients et les architectes de mesurer si la conception est

satisfaisante - ou aurait pu être meilleure. Il s'agit du principe de la POE ou Post-Occupancy Evaluation [38].

Cette pratique est encore trop peu usitée, cependant la possibilité de s'appuyer sur des outils numériques puissants et adaptés lui a donné un gain d'intérêt. Concrètement, il s'agit de réaliser l'étude des comportements des utilisateurs du bâtiment ou des infrastructures (gare, centre commercial, etc.) et de la mettre en lien avec la conception, l'architecture et l'agencement. Les thématiques de confort sont bien sûr abordées, cependant mesurer la satisfaction des personnes est souvent compliqué. En effet, ces derniers n'ont souvent pas le temps de s'attarder sur ces questions, et construire des indicateurs précis est souvent impossible.



Figure 38 : Simulation de flux dans un aéroport, source Redshift [39]

C'est pourquoi certains bureaux d'étude comme ARUP [40] font désormais de la POEPC : Post-Occupancy Evaluation Preconstruction [41]. Si cela peut paraître oxymorique, le schéma de principe est simple : construire le bâtiment, occuper le bâtiment, et l'évaluer. Tout cela en s'appuyant uniquement sur l'outil numérique.

On observe ici encore une fois l'apport des moteurs graphiques de jeux vidéo : d'une part, ils permettent une immersion assez réaliste pour recréer une situation d'utilisation, d'autre part ils permettent une modification simple et efficace des éléments d'architecture et de construction. Cependant ici, c'est la dynamique de déplacement inspirée du jeu vidéo qui est innovante.



Figure 39 : Etude des flux, source : Redshift [39]

Les figures 38 et 39 représentent une étude où un ensemble de « joueurs » déambulent dans une grande station ferroviaire. Seule une dizaine de joueurs sont présents et contrôle un « personnage » (ces joueurs incluent des personnes en fauteuil roulant et des femmes enceintes, qui ont des personnages tenant compte de leur situation particulière). Ceux-ci doivent rejoindre des points précis communiqués via l'interface. Ils ne peuvent se repérer que par les panneaux

présents dans la réalité et par des cartes présentes sur des panneaux également dans l'environnement. Ces points forment ainsi un parcours prédéfini par l'entreprise au préalable.

Ainsi, l'entreprise peut vérifier l'efficacité du fléchage, de l'emplacement des informations, la disposition des différents points de ventes de billets, des guichets, etc. Les ingénieurs peuvent mesurer les temps de déplacements, avoir le détail des parcours réalisés par les « joueurs » très facilement. Ils peuvent modifier les emplacements, voir le plan de toute la station très facilement. Et enfin avoir un retour facile des « joueurs » et leurs impressions.

La POE réalisée par simulation numérique, permet donc sans avoir à construire l'infrastructure, d'avoir déjà un retour des utilisateurs sur de nombreux aspects et paramètres.

2.1.3 - Utilisation directe des jeux vidéo dans l'architecture

Dans certains projets, les jeux vidéo peuvent être utilisés directement dans la conception de maquette 3D ! L'exemple le plus parlant est le jeu *Minecraft* [42]. Par la possibilité de construire « bloc par bloc » avec facilité, et de collaborer avec les autres joueurs comme si « on construisait vraiment le bâtiment » (puisque l'on incarne un personnage se déplaçant dans un univers, construisant au fur à mesure que le personnage se déplace), l'expérience de construction est différente d'un logiciel de design classique.

C'est cette dynamique de construction inédite que James Delaney a choisi d'exploiter. Il est le fondateur de *BlockWorks* [43], une société regroupant une quarantaine de « builders » (joueurs et architectes !) travaillant sur différents projets de maquette virtuelle sur *Minecraft*. On peut citer en exemple la reproduction de la ville d'Exeter pour le Royal Albert Memorial Museum, effectuée en 2017 [44].



Figure 40 : Reproduction de la ville d'Exeter pour le Royal Albert Memorial Museum, source BlockWorks [44]



Figure 41 : Vue d'une rue d'Exeter au XIXe siècle, source : BlockWorks [44]

On rappelle que l'on peut de déplacer sur cette map à la manière d'un touriste et se déplacer dans toutes les rues !

« More than 100 million people populate Minecraft, where they can build their own worlds and inhabit them through play. These fictional worlds empower people with the tools to transform their own environments. This is what architecture ought to be. »
James Delaney, BlockWorks CEO. [45]

Pourrait-on réellement utiliser *Minecraft* pour *construire* un bâtiment, et non pas le reproduire ? Il n'existe pas de réel projet utilisant *Minecraft* comme rendu graphique qu'un cabinet d'architecture présenterait à ses clients. Cependant, Andrew McClure, un architecte, s'est prêté au jeu d'utiliser *Minecraft* pour *designer* une maison et livrer son avis sur les différences et similitudes avec ce qu'il fait à son bureau.

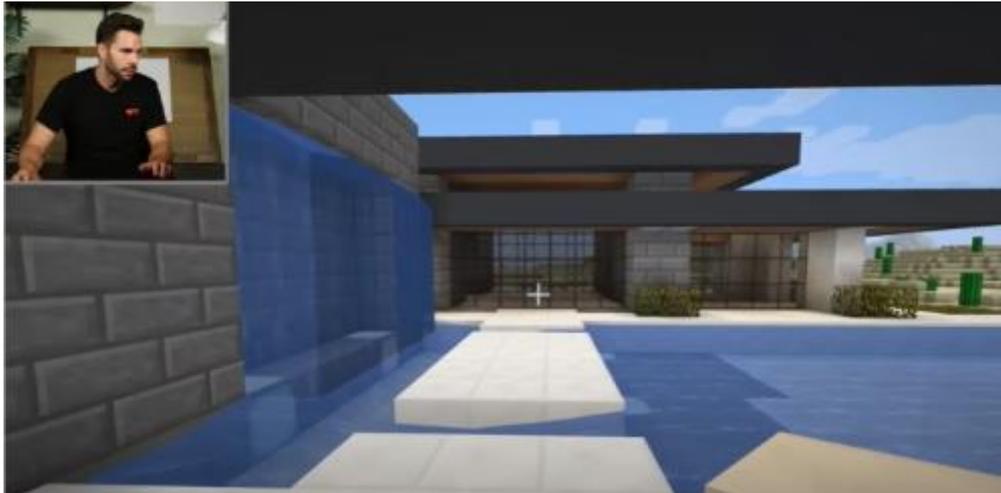


Figure 42 : Minecraft permet-il de réaliser un projet d'architecture ? Source You Tube [46]

« This is a decent representation of kind of the stuff that we do. Definitely a lot more details and planning going into a real project, but it's quite realistic. »
Andrew McClure, Architect/Designer. [46]

2.2 - L'émergence de la réalité virtuelle : de nouvelles possibilités

Nous allons voir l'importance de la qualité graphique dans le domaine de la construction, et en particulier dans l'architecture. Les entreprises et bureaux d'études étant à la recherche de l'expérience la plus immersive possible, il n'y avait qu'un pas supplémentaire qui les séparait de la réalité virtuelle. La « réalité virtuelle » est un terme générique évoquant les technologies basées sur l'intégration d'éléments numériques virtuels dans le monde réel. Celles-ci, de la même manière que les moteurs graphiques de jeux vidéo, sont de plus en plus utilisées par les entreprises. Elles sont regroupées en 3 catégories [47].

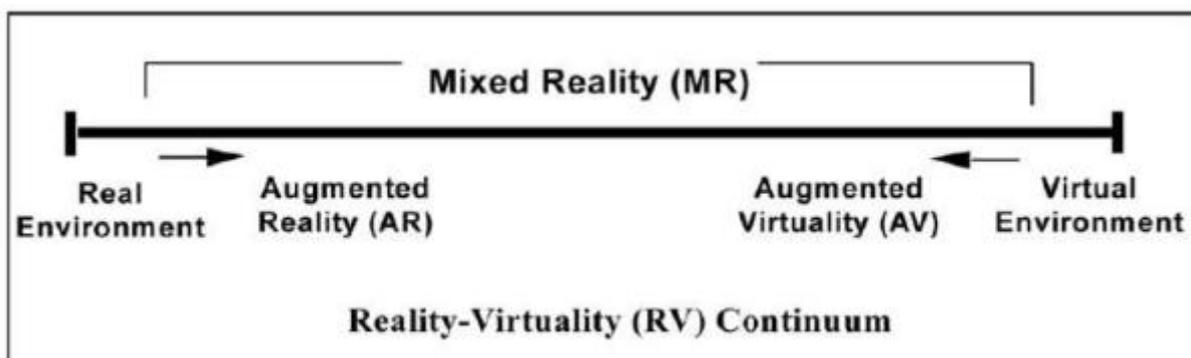


Figure 43 : Ensemble des technologies de réalité virtuelle, source Aniwaa [47]

La réalité virtuelle (VR pour virtual reality) englobe toutes les expériences immersives disponibles via un casque de réalité virtuelle (aussi appelé HMD pour head-mounted display). L'utilisateur est totalement coupé du monde réel, dans un environnement virtuel visible grâce au casque de réalité virtuelle. Ce type d'expérience est surtout utilisé en début de projet pour présenter des vues d'ensemble aux clients sur les différentes possibilités dans les phases d'avant-projet sommaire et définitif, et lors de la réalisation des plans détaillés en intégrant la maquette numérique.

Une expérience intéressante de cette approche de réalité virtuelle est un projet concernant le Learning Center de l'Université Paris-Saclay du quartier du Moulon, département de l'Essonne. Il s'agit d'un projet spécifique qui a été proposé dans le cadre de l'enseignement « RD Innovation », option « Aménagement et construction durables » aux élèves-ingénieurs en troisième année de CentraleSupélec : l'aménagement du Learning Center en réalité virtuelle afin d'adapter les espaces aux usages et aux futurs usagers [48]. C'est donc un projet de POEPC (Post-Occupancy Evaluation Preconstruction) [38] [39] comme présenté en amont. D'une manière générale, la POEPC, spécifique au domaine de la construction, s'inscrit dans le domaine de l'UX Design (User Experience Design), [49] qui se résume en l'anticipation des attentes des utilisateurs, pour rendre les interfaces les plus ergonomiques, intuitives, faciles d'utilisation possible, en se basant sur les ressentis de ces-derniers.



Figure 44 : Vue de nuit de l'architecture prévue pour le Learning Center, source Beaudouin Architecture [50]

Le Learning Center « Lumen » est l'espace de mutualisation des équipes documentalistes et bibliothèques de l'Université Paris-Sud, de CentraleSupélec et de l'ENS Paris-Saclay. Il comportera de nombreux espaces publics prévus pour les étudiants, enseignants, chercheurs et le personnel du campus. Ce projet a permis de réunir des acteurs de la maîtrise d'ouvrage, des chercheurs, des bibliothécaires, et en premier lieu des étudiants, en vue de réfléchir au mieux à la façon d'investir les lieux. Il est piloté par le LIMSI (Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur), laboratoire CNRS du plateau, et plus particulièrement par Jean-Marc Vézien, ingénieur de recherche, spécialiste de la réalité virtuelle. Grâce à un ensemble de scénarios conçus par les équipes du projet, les futurs utilisateurs « éprouvent » la maquette virtuelle du Learning Center et dressent en retour « une liste de préconisations touchant aussi bien au choix du mobilier qu'à la signalétique ou aux schémas de circulation », informe M. Vézien [48]. Il s'agit donc d'un projet mêlant intérêt éducatif, réalité virtuelle et construction !



Figure 45 : Expérience de réalité virtuelle du Learning Center, source Université Paris-Saclay [51]

La réalité augmentée (AR pour augmented reality) permet de superposer du contenu numérique au monde réel (objets virtuels, informations, etc.). L'utilisateur voit toujours l'environnement réel, avec en surimpression cette couche de contenu numérique. L'affichage s'effectue sur un écran visible par l'utilisateur, le plus souvent via des lunettes de réalité augmentée ou via un smartphone avec une application spécifique offrant des capacités de réalité augmentée. La réalité augmentée est étudiée aujourd'hui pour devenir une ressource d'aide pour les personnes sur chantier.

En utilisant la maquette BIM, les ouvriers pourraient avoir accès à des informations de tous types (dimensions, compositions, dates de poses d'éléments structuraux, etc.) directement superposées sur la réalité, avoir une vue des infrastructures non-construites, des instructions de travail pas-à-pas grâce à une interface intelligente et même... voir à travers les murs! [52]. L'entreprise américaine *DAQRI* [54] est professionnelle dans la conception de casque et de lunettes de réalité augmentée pour différentes industries. Ces casques ont pour but d'améliorer la compréhension des machines et des processus en cours dans une usine en temps réels par les employés par exemple. Un de leur projet futur est de concevoir un casque de chantier de réalité augmentée [55] permettant d'aider les ouvriers.



Figure 46 : Smart Glasses, source DAQRI [53]



Figure 47 : Smart Helmet, source Redshift [52]

« *Imagine you're part of a crew constructing a new office building: Midway through the process, you're on-site, inspecting the installation of HVAC¹ systems. You put on a funny-looking construction helmet and step out of the service elevator. As you look up, there's a drop ceiling being installed, but you want to know what's going on behind it.*

Through the visor on your helmet, you pull up the Building Information Model (BIM), which is instantly projected across your field of vision. There are heating ducts, water pipes, and electrical boxes, moving and shifting with your point of view as you walk along the corridors. Peel back layers of the model to see the building's steel structure, insulation, and material finishes. It's like having comic book-style X-ray vision—and soon, it could be a reality on a construction site near you. » Roy Ashok, DAQRI CEO. [52]

La réalité mixte (MR pour mixed reality) combine plusieurs technologies. Un casque de réalité mixte permet d'intégrer des éléments virtuels dans le monde réel en permettant à ces éléments d'interagir avec l'environnement. L'utilisateur n'est pas coupé du monde réel, il peut voir au travers du casque ou des lunettes de réalité mixte. L'utilisation de la réalité mixte peut être également combinée à l'utilisation de drones par exemple, pour améliorer la sécurité des sites à risques ou repérer les sites où une maintenance est nécessaire.

Si la technologie de la réalité virtuelle n'est pas encore très répandue dans le secteur de la construction, il est sûr que nombreux projets dans le futur voudront essayer de saisir cette opportunité afin de réduire leur coûts de conception, améliorer les sécurités des ouvriers et les relations avec les clients.

3 – Conclusion

Les jeux vidéo et le réalisme des constructions dans ces derniers se sont améliorés au fil des années. Cela a permis à de nombreux liens de se tisser entre le monde du jeu vidéo et celui de la construction, sous des formes très différentes. De cartographies laser de cathédrale pour *Assassin's Creed* aux reconstitutions de quartier d'Exeter sur *Minecraft*, l'architecture est très présente dans les jeux vidéo. Réciproquement, les casques de réalité virtuelle et les jeux-expérience utilisés pour la *Post Occupancy Evaluation* montrent que les jeux vidéo sont de plus en plus présents dans le monde de la construction et du génie civil.

Une des formes les plus spécifiques de ces liens est l'utilisation des jeux de construction pour la pédagogie. Construire un cours grâce à *Minecraft* permet de répondre que non, il ne faut pas bannir *Minecraft*, au contraire. Il faut pouvoir l'utiliser comme point d'accroche pour non pas représenter la réalité, mais l'expliquer en repartant du plus simple.

Références :

[1]: Graphisoft, Archicad, <https://archicad.fr/>

[2]: Autodesk, Revit, <https://www.autodesk.fr/products/revit/overview>

[3]: Autodesk, Un BIM d'or récompense la conception de l'ENS, Août 2016, <https://www.autodesk.fr/campaigns/ens-cachan>

[4]: Quand l'architecture devient un terrain de jeu. Maison de l'Architecture Haute-Savoie, Octobre 2019, <http://www.maison-architecture-74.org/video-games.htm>

¹ HVAC = Heating, Ventilation and Air-Conditioning

- [5]: Ubisoft, Assassin's Creed, <https://www.ubisoft.com/fr-fr/game/assassins-creed/>
- [6]: Ubisoft, <https://www.ubisoft.com/fr-fr/>
- [7]: Chromerit, Notre-Dame-de-Paris : la 3D et Assassin's Creed Unity vont aider à sa reconstruction, Hitek.fr, Avril 2019, https://hitek.fr/actualite/notre-dame-reconstitution-assassins-creed_19108
- [8]: Ubisoft, Assassin's Creed Unity, Novembre 2014, <https://www.ubisoft.com/fr-fr/game/assassins-creed-unity/>
- [9]: Incendie à Notre-Dame de Paris : Ubisoft offre un téléchargement gratuit d'Assassin's Creed Unity, Europe1, Avril 2019, <https://www.europe1.fr/culture/incendie-a-notre-dame-de-paris-ubisoft-offre-un-telechargement-gratuit-d-assassins-creed-unity-3893658>
- [10]: William Audureau. Notre-Dame de Paris : les reconstitutions en 3d peuvent aider à la reconstruction, Le Monde, Avril 2019, https://www.lemonde.fr/pixels/article/2019/04/16/notre-dame-de-paris-les-reconstitutions-en-3d-peuvent-aider-a-la-reconstruction_5451178_4408996.html
- [11]: Henri, Notre-Dame de Paris : Et si assassin's Creed Unity aidait à la reconstruction ? Journal du Geek, Avril 2019, <https://www.journaldugeek.com/2019/04/17/notre-dame-paris-assassins-creed-unity-aidait-reconstruction/>
- [12]: National Geographic, Laser Scanning Reveals Cathedral's Mysteries, Juin 2015, https://www.youtube.com/watch?time_continue=244&v=jAi29udFMKw&feature=emb_logo
- [13]: Ubisoft, Ressusciter la Halle aux Blés. Stories, Janvier 2020, <https://stories.ubisoft.com/article/bourse-de-commerce-assassins-creed/>
- [14]: J. Bury, Halle au Blé de Paris, 1853. <http://paristeampunk.canalblog.com/archives/2017/02/23/34971839.html>
- [15]: EA Games, Sim City, <https://www.ea.com/fr-fr/games/simcity>
- [16]: Bruno Morleo, Urbaniste vs Sim City, *Urbanews*, November 2012, <https://www.urbanews.fr/2012/11/06/26215-urbaniste-versus-simcity/>
- [17]: Colossal Order, Cities: Skylines, <https://www.macgames.fr/produits/Cities-Skylines-Mac-0791058105617.htm>
- [18]: Nick Vivey, Review: Construction Simulator 3, *Gaming Boulevard*, Avril 2020, <https://www.gamingboulevard.com/2020/04/review-construction-simulator-3/>
- [19]: Astragon, Construction Simulator 3, <https://www.astragon.de/en/news/construction-simulator-3-console-edition/>
- [20]: Pierre Otin, Test : « PolyBridge », le hit PC superbement adapté à l'iPhone et l'iPad, *Iphon.fr*, Juin 2017, <https://www.iphon.fr/post/beau-jeu-construction-poly-bridge-iphone-ipad-883292>
- [21]: Florent Lacas, Le BTP s'empare des « Serious games », *Le Moniteur*, Juillet 2012, <https://www.lemoniteur.fr/article/le-btp-s-empare-des-serious-game.1372334>
- [22]: Nicky Case, The Evolution of Trust, <https://ncase.me/trust/>
- [23]: Ministère de l'Éducation Nationale, Programme de Technologie au Collège, 2016, https://eduscol.education.fr/technocol/nouveaux_programmes
- [24]: Edumedia-sciences, Les Ponts, <https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/633-les-ponts>

- [25]: Alex Austin, Bridge Building Game, <https://www.technologie-college.com/?Logiciel-Bridge-Building-Game>
- [26]: Autodesk, Robot Structural Analysis, <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview>
- [27]: MinecraftWiki, Blocs, <https://minecraft-fr.gamepedia.com/Blocs>
- [28]: Florian Reynaud, Dix ans d'histoire de « Minecraft », l'un des jeux les plus populaires du monde, en dix étapes, Le Monde, Mai 2019, https://www.lemonde.fr/pixels/article/2019/05/17/dix-ans-d-histoire-de-minecraft-l-un-des-jeux-les-plus-populaires-du-monde-en-dix-etapes_5463137_4408996.html
- [29]: MinecraftWiki, Terres Lointaines, https://minecraft-fr.gamepedia.com/Terres_lointaines
- [30]: MinecraftWiki, Physique, <https://minecraft-fr.gamepedia.com/Physique>
- [31]: MinecraftWiki, Entités, <https://minecraft-fr.gamepedia.com/Entit%C3%A9s>
- [32]: MrSinaf, Dispersion de l'eau, <https://www.lecomptoirducliqueur.fr/tutorial/dispersion-de-leau>
- [33]: MinecraftWiki, Redstone, <https://minecraft-fr.gamepedia.com/Redstone>
- [34]: Microsoft, Minecraft Education Edition, <https://education.minecraft.net/>
- [35]: Erin Green, Game On: New Service Brings Revit Models to Life, Engineering.com, 2016, https://www.engineering.com/story/game-on-new-service-brings-revit-models-to-life?_hsfp=3196184765&_hssc=212727627.1.1610755200094&_hstc=212727627.74ba06f08984886db67907baa412a682.1610755200091.1610755200092.1610755200093.1&utm_source=relart-etips
- [36]: Ioana Maria Pacs, Comment les technologies inspirées des jeux vidéo peuvent aider à construire la réalité. Everbim.com, Septembre 2019
- [37]: Mohammed Khettab, Visites virtuelles et immersives pour les utilisateurs de Revit avec « Live », Hexabim.com, Août 2016, <https://www.hexabim.com/blog/visites-virtuelles-et-immersives-pour-les-utilisateurs-de-revit-avec-autodesk-live>
- [38]: Elizabeth Evitts Dickinson, Why Your Firm Should Embrace the Post-Occupancy Review. Architect Magazine, Septembre 2014, https://www.architectmagazine.com/practice/best-practices/why-your-firm-should-embrace-the-post-occupancy-review_o
- [39]: Angus W Stocking, A Video Game Is Overtaking Post-Occupancy Evaluation in Architecture. Redshift, Août 2016, <https://redshift.autodesk.com/post-occupancy-evaluation/>
- [40]: Arup, <https://www.arup.com/>
- [41]: Arup, Admiralty station 3d wayfinding, <https://www.arup.com/projects/admiralty-station-3d-wayfinding>
- [42]: Mojang, Minecraft, <https://www.minecraft.net/fr-fr/>
- [43]: BlockWorks. Portfolio, 2020, <https://www.blockworks.uk/portfolio>
- [44]: BlockWorks, Exeter, Royal Albert Memorial Museum, Juin 2017, <https://www.blockworks.uk/exeter>
- [45]: Kim O'Connell, Minecraft Architecture: What Architects Can Learn From a Video Game, Redshift, Février 2016, <https://redshift.autodesk.com/minecraft-architecture/>
- [46]: BuzzFeed-YouTube, A real architect builds a mansion in Minecraft • Professionals play, 2018, https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=6XFINpi72Nw&feature=emb_logo

- [47]: Steve Noble, VR, AR, MR : le guide ultime. Aniwaa.com, Décembre 2018, <https://www.aniwaa.fr/guide/vr-ar/vr-ar-mr-guide-ultime/>
- [48]: Paoletti Camille, Sempéré Julien. "Projeter son habitat" : Le Learning Center de l'Université Paris-Saclay et le quartier de Moulon. Bulletin des Bibliothèques de France (BBF), (17) : 96-105, 2019, <https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2019-17-0096-010>
- [49]: Emmanuelle, L'UX Design : qu'est-ce que c'est ? Creads Design Tribe, <https://www.creads.com/blog/tendance-design-graphique/ux-design>
- [50]: Beaudoin Architecture, Learning Center Saclay, 2016, <http://www.beaudouin-architectes.fr/2017/04/learning-center-saclay/>
- [51]: Université Paris-Saclay. Le Learning Center de l'Université Paris-Saclay développe un projet d'UX, Design en réalité virtuelle, Avril 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=yUpu5f6PL4Q>
- [52]: Zach Mortice. Augmented Reality in Construction Lets You See Through Walls. Redshift, Mai 2017, <http://zachmortice.com/2017/05/24/augmented-reality-construction-lets-see-walls/>
- [53]: Daqri, Smart Glasses, <https://daqri.com/products/smart-glasses/>
- [54]: Daqri, <https://daqri.com/>
- [55]: Ekaterina Novoseltseva, Daqri Smart Helmet - VR AR for 4.0 Industry. Apiumhub.com, Décembre 2018, <https://apiumhub.com/tech-blog-barcelona/daqri-smart-helmet-vr-ar-4-0-industry/>