

Architecture événementielle pour les  
Environnements Virtuels Collaboratifs sur le web :  
Application à la manipulation et à la visualisation  
d'objets 3D

Caroline Desprat

20 septembre 2017

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Problématique . . . . .	4
1.2	Contributions . . . . .	6
1.2.1	Contributions théoriques . . . . .	6
1.2.2	Contributions pratiques . . . . .	7
1.3	Organisation du manuscrit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Contexte</b>	<b>8</b>
2.1	La collaboration . . . . .	9
2.1.1	Les systèmes collaboratifs . . . . .	12
2.1.2	Les systèmes d'édition collaboratifs . . . . .	12
2.2	La collaboration 3D en accord avec l'évolution du web . . . . .	12
2.2.1	Introduction . . . . .	12
2.2.2	Le web et le P2P : WebRTC . . . . .	12
2.2.3	Le web et la 3D : WebGL . . . . .	12
2.3	Les architectures évènementielles pour la collaboration . . . . .	12
2.3.1	Sensibilisation lors de la collaboration . . . . .	12
2.3.2	Intégration des contraintes métiers . . . . .	12
<b>3</b>	<b>État de l'art</b>	<b>13</b>
3.1	Modélisation 3D collaborative sur le Web . . . . .	14
3.2	Communication en temps-réel . . . . .	19
3.3	Systèmes d'édition collaborative . . . . .	21
3.3.1	Le modèle de cohérence CCI . . . . .	21
3.3.2	Les approches pour les données 3D . . . . .	21
3.3.3	Conclusion . . . . .	21
3.4	Les systèmes évènementiels distribués pour la collaboration . . . . .	21
3.4.1	Introduction . . . . .	21
3.4.2	Domain Driven Design : lier le fonctionnel et le code . . . . .	21
3.4.3	Command Query Responsibility Segregation : garantir de l'intégrité des données . . . . .	22
3.4.4	Event Sourcing : certifier la fiabilité et traçabilité des données	23
3.4.5	Conclusion . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Contributions scientifiques</b>	<b>29</b>
4.1	Modèle évènementiel pour l'intégration du domaine 3D lors de la manipulation d'objets 3D . . . . .	30

4.1.1	Modèle général . . . . .	33
4.1.2	Mécanisme de gestion de version . . . . .	36
4.1.3	Cohérence Éventuelle en CQRS . . . . .	36
4.1.4	Potentielles applications et autres utilisations . . . . .	37
4.1.5	Bilan . . . . .	38
4.2	Architecture de communication hybride . . . . .	38
4.2.1	Présentation générale . . . . .	41
4.2.2	Event Store . . . . .	42
4.2.3	Persistance à long terme . . . . .	44
4.2.4	Synchronisation client-serveur . . . . .	44
4.2.5	Gestion de la cohérence . . . . .	45
4.2.6	Bilan . . . . .	45
4.3	Conclusion du chapitre . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Implantation</b>	<b>46</b>
5.1	3DEvent : Plateforme web de manipulation et visualisation collabora- tive d'objets 3D . . . . .	47
5.1.1	Éditeur 3DEvent . . . . .	47
5.1.2	Interface utilisateur . . . . .	48
5.1.3	Flexibilité de la visualisation . . . . .	49
5.2	Intergiciel P2P pour l'échange de données 3D . . . . .	50
5.2.1	Données d'échange . . . . .	51
5.2.2	Synchronisation des données . . . . .	51
5.3	Résumé des choix techniques . . . . .	52
5.4	Bilan . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Expérimentations</b>	<b>54</b>
6.1	Cas d'étude : Assemblage collaboratif d'objets 3D dans un environne- ment web . . . . .	55
6.2	Expérimentation 1 : preuve de faisabilité . . . . .	55
6.2.1	Présentation de l'expérimentation . . . . .	55
6.2.2	Résultats . . . . .	55
6.2.3	Discussion et Conclusion . . . . .	55
6.3	Expérimentation 2 : Intégration du framework évènementiel . . . . .	55
6.3.1	Résultats et Discussion . . . . .	57
6.4	Comparaison entre l'expérimentation 1 et l'expérimentation 2 . . . . .	60
6.4.1	Résultats . . . . .	60
6.4.2	Discussion et Conclusion . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>66</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### Contents

---

<b>1.1</b>	<b>Problématique</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>Contributions</b>	<b>6</b>
1.2.1	Contributions théoriques	6
1.2.2	Contributions pratiques	7
<b>1.3</b>	<b>Organisation du manuscrit</b>	<b>7</b>

---

---

Le besoin de collaboration et de manipulation en temps-réel d'objets en **tri-dimension (3D)** ainsi que leur contrôle de version a été très tôt une raison de la dissémination des outils pour la **Conception Assistée par Ordinateur (CAO)**. Tandis que l'ingénierie et la visualisation scientifique ont produit des quantités de données massives dans des domaines tels que la conception architecturale, l'industrie des jeux ou encore l'impression **3D**, un besoin croissant de maintenir, visualiser et manipuler de larges scènes **3D** polygonales pouvant être éditées par de multiples utilisateurs de manière concurrente se fait sentir [Chandrasegaran *et al.*, 2013, Wu *et al.*, 2014]. Or, la quantité et la taille des données étant toujours croissante, il devient de plus en plus difficile de partager les modèles, particulièrement avec les utilisateurs n'ayant pas accès aux derniers logiciels et matériels graphiques. C'est pourquoi nous observons un développement en forte progression de plateformes légères déployées sur le web permettant de répondre à ces besoins. Dans un **Environnement Virtuel Collaboratif 3D (EVC 3D)**, la simulation distribuée d'un environnement virtuel 3D, un grand nombre d'utilisateurs situés à différents endroits géographiques peuvent interagir les uns avec les autres en temps-réel. Cette distorsion de l'espace physique et temporel impose aux **EVC 3D** des mécanismes de communication rapide, conservant un environnement cohérent des données partagées durant la collaboration. L'utilisation d'un client comme medium pour accéder à l'**EVC 3D** est requise pour envoyer des demandes au serveur. Le client peut être manipulé par un utilisateur ou un agent logiciel (bot). Un **EVC 3D** se compose également un protocole de communication qui permet aux différents clients d'échanger les mises à jours correspondants aux modifications effectuées dans l'espace 3D virtuel partagé. La distribution des données devient alors un enjeu de taille dans ce type d'application en terme de temps, de sécurité et de fiabilité.

L'exigence vis-à-vis des temps de réponse est de plus en plus grande pour deux raisons principales : les limitations humaines (mémoire et attention limitées à court terme) et les aspirations de l'être humain (besoin d'être en contrôle sur les machines). S'accroissant au gré de la technologie et aux attentes utilisateurs (rétro-compatibilité, temps de chargement), elle varie selon le domaine mais reste très assez prégnante sur le web en général. Par exemple, dans un domaine annexe comme le e-commerce, une étude réalisée en 2006 explique qu'une grande partie des internautes abandonnaient leurs achats en ligne si les pages mettaient 4 secondes ou plus à charger. De nos jours, ce délai a été réduit au quart de seconde pour les grandes entreprises du web. Jakob Nielsen [Wikipedia, 2013] indique trois temps de réponse limites concernant les temps de réponses :

- 
- *0,1 seconde* donne une sensation de réponse instantanée, comme si le résultat avait été produit par l'utilisateur et non l'ordinateur. Ce niveau de temps de réponse soutient la sensation de manipulation directe.<sup>1</sup>
  - *1 seconde* garde le flux de pensées de l'utilisateur sans interruption. L'utilisateur peut ressentir un délai et par conséquent savoir que c'est la machine qui génère le résultat ; l'utilisateur a quand même une impression de contrôle sur l'expérience générale et peut se déplacer librement dans l'interface sans attendre la machine. Ce degré de réactivité est impératif pour une bonne navigation.
  - *10 secondes* conservent l'attention de l'utilisateur. Entre 1 et 10 secondes, l'utilisateur se sent dépendant de la machine, mais peut faire avec. Au delà, l'utilisateur va commencer à penser à d'autres choses, rendant difficile le retour à la tâche une fois que la machine répond.

Dans le domaine de l'édition et la manipulation collaborative d'objets 3D, les contraintes abordées se situent à divers degrés : au chargement et lors des mises à jour. Le chargement concerne la phase de téléchargement de l'application web et des données relatives mais également d'affichage des modèles 3D sont spécifiques dans ce domaine car ils ont tendance à être lourds (structure de données 3D et métadonnées) à charger (contrairement au texte par exemple). Cette phase peut s'accorder des délais relativement long (1-10s) compte tenu du fait que l'utilisateur connaît en partie ces contraintes liées à la taille des objets 3D. Concernant les mises à jour, l'édition collaborative requiert un temps de réponse raisonnablement court est contraint par l'exactitude des calculs et le temps dans lequel le résultat est produit. Pour les mises à jour internes – produites par l'utilisateur, actions sur l'interface – on s'accordera sur un délai inférieur à 0,1 seconde dans cette thèse. Pour les mises à jour externes – produites par les collaborateurs – les latences réseaux rentrent en comptes (serveur, pairs. . .) on s'accordera sur un délai entre 1 et 10 secondes dans cette thèse selon les degrés d'asynchronicité possible.

Les bureaux d'études en ingénierie et en architecture travaillent sur des projets (visualisation [CAO](#), [Business Information Modeling \(BIM\)](#), gestion et arrangement d'espaces architecturaux) qui nécessitent la collaboration de professionnels venant de milieux différents avec des compétences et connaissances variées. Les modifications dans leurs modèles en [3D](#) doivent être revues par des gestionnaires de projet, des

---

1. En IHM, la manipulation directe correspond à un mode d'interaction au cours duquel les utilisateurs font des actions sur les objets d'intérêt affichés dans l'interface utilisateur en utilisant des actions physiques, incrémentales et réversibles dont les effets sont immédiatement visibles sur l'écran.

clients et les intervenants impliqués qui peuvent à leur tour suggérer des modifications sur la conception. Toutes ces entités ont besoin d’être capables de charger les ressources pour pouvoir les inspecter et les analyser. Ces contraintes se retrouvent dans le domaine du [BIM](#), l’architecture, l’héritage culturel, ou plus généralement dans des milieux transdisciplinaires concentrés sur la [3D](#). L’évolution de ces ressources passent par une visualisation et une manipulation collaborative efficace en terme de chargement de ressources et de transmission des mises à jour.

## 1.1 Problématique

Cette thèse se situe à l’interface de trois champs de recherches (Figure [1.1](#)). Le premier concerne les environnements de modélisation 3D. Souvent commerciaux (Clara.io, OnShape, Verold Studio), les modeleurs utilisent des technologies supportée par les navigateurs web qui leur permettent d’être disponibles sur la plupart des plateformes. Cependant ces derniers reposent sur une gestion centralisée des données qui rend les utilisateurs très dépendants de la disponibilité de ces plateformes et d’une connexion internet pour la distribution des informations. Mises à part quelques exceptions, les fonctionnalités collaboratives sont souvent présentées comme mineures. Même si le « partage » de la visualisation à la manière des « réseaux sociaux » est assez courant, l’édition collaborative est souvent complexe à implémenter car les besoins sont nombreux. Parmi eux, on trouve tout d’abord le besoin d’avoir un système distribué conservant la cohérence des modifications de chacun des utilisateurs. Or, le nombre d’utilisateurs ne doit pas affecter l’expérience utilisateur ; le système doit supporter le passage à l’échelle. Le nombre d’utilisateurs élevé implique la mise en place d’un système de distribution de données adapté. Ce système est en plus contraint par la dynamicité des arrivées et départs des collaborateurs (*churn*) au cours d’une session. La dynamicité, qui ne permet pas d’avoir de pouvoir compter sur un nombre fixe de ressources, doit s’accorder avec les besoins variables en termes de ressources. Chaque client est porteur de ressources rarement complètement exploitées lors d’épisodes collaboratifs.

La visualisation et la manipulation collaborative d’objets [3D](#) sont sujettes à plusieurs problématiques telles que la cohérence des ressources manipulées au cours du temps. Dans ce contexte, il existe un fort besoin de gérer l’évolution des versions permettant la revue des modèles [3D](#). En s’appuyant sur les ressources à dispositions, tels que les clients (navigateurs web) sur lesquels les utilisateurs manipulent les modèles [3D](#), le passage à l’échelle est plus flexible car les ressources augmentent avec

le nombre de client et procurant également plus d'autonomie aux utilisateurs utilisant leurs ressources propres. L'architecture de communication et les contraintes liées aux architectures distribuées et décentralisée correspond au second axe de recherche. Enfin, le dernier champs s'adresse à la partie que nous appellerons « métier » qui se rapporte au domaine de la manipulation d'objets 3D qui inclue la gestion du cycle de vie des données 3D de l'interaction utilisateur à son stockage en passant par sa distribution. Ces aspects se rapportent principalement à l'historique, la traçabilité de l'information et l'expertise embarquée dans le système dans le cadre de cette thèse.

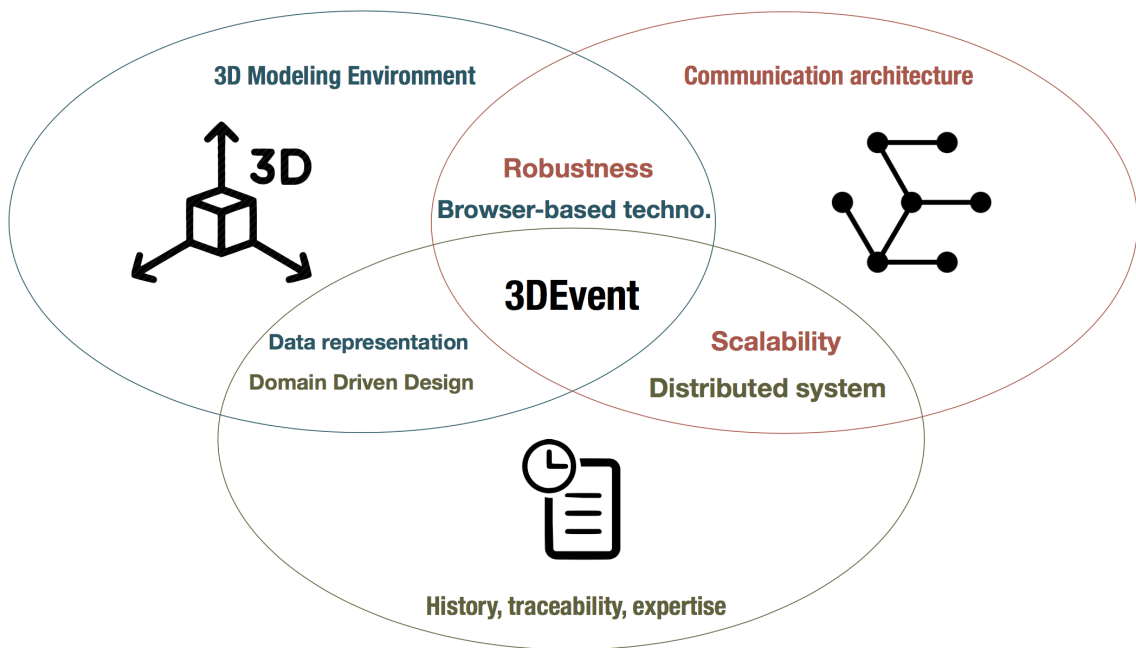


FIGURE 1.1 – Place de la contributions dans les différents champs de recherche

L'objectif de cette thèse est triple : (i) extraire les informations liées aux règles métier pour l'affichage et la manipulation d'objets 3D en collaboration nécessaires à la traçabilité de l'information, (ii) repérer les principales problématiques de gestion des données sur le réseau pour avoir une transmission efficace et transparente pour l'utilisateur, (iii) proposer un **framework** pour un **EVC 3D** web intégrant ces contraintes réseau, métier, et 3D dans un navigateur. Dans le but d'achever de tels objectifs, voici les cinq Questions de Recherche posées :

- QR 1** Quelle architecture réseau est la plus adaptée pour une gestion efficace, robuste et temps-réel des données 3D dans un environnement web ?
- QR 2** Quelle architecture logicielle confère une traçabilité des données conforme aux règles métier liées à la manipulation d'objet 3D ?



- QR 3** Quels sont les mécanismes assurant à l'utilisateur d'être à la fois autonome tout en ayant la possibilité de collaborer ?
- QR 4** Comment faciliter l'implémentation d'un tel système en garantissant le respect des règles métier liés à la manipulation d'objet 3D ?
- QR 5** Quelles sont les métriques (réseau, collaboration) permettant d'évaluer un tel système de manière quantitative ? qualitative ?

## 1.2 Contributions

La principale contribution de cette thèse est la définition et l'implémentation d'un ensemble de pratiques dans la gestion des données pour la manipulation d'objets 3D de manière collaborative sur web. Cela est très utile pour la gestion de l'historique d'une scène 3D en utilisant des contenus 3D de différentes natures. Pour ce faire, j'ai choisi le paradigme événementiel et je l'ai intégré à mon modèle de collaboration grâce à l'utilisation de solutions préexistantes pour le partage et la diffusion de contenus 3D dans le cadre d'applications collaboratives sur le web.

La force motrice derrière ce travail a été le manque de processus et d'outils qui pourraient réellement supporter la modélisation collaborative 3D et la visualisation à l'échelle exigée par l'industrie, l'identification de problèmes spécifiques et leur formulation a également été importante. La recherche, cependant, introduit de nouveaux concepts dans le domaine de la gestion de données 3D. Les contributions de cette thèse peuvent être résumées comme suit.

### 1.2.1 Contributions théoriques

- Proposition d'un système de gestion et de visualisation de contenu 3D avec un historique non linéaire orienté événements
- Définition d'une architecture hybride (client serveur et pair à pair (P2P)) adapté à la distribution de contenus 3D dans le cadre d'une collaboration sur web en temps-réelle.
- Introduction des concepts d'événements métiers liées à la 3D comme moyen d'interagir dans une scène 3D multi-échelle

### 1.2.2 Contributions pratiques

- Définition d'une API ouverte et de l'application cliente utilisation les principes et les technologies du web.
- Implémentation d'un prototype 3DEvent Client et de son évaluation utilisateur
- Implémentation d'un prototype 3DEvent Architecture et de son évaluation

## 1.3 Organisation du manuscrit

La présence de la 3D et des environnements virtuels collaboratifs 3D est de plus en plus présents dans l'industrie de la CAO nécessitant de nouveaux modèles, outils et méthodes facilitant la mobilité et l'autonomie des utilisateurs. Il est aussi important de noter que le contenu multimédia 3D est aussi de plus en plus présent dans notre quotidien. Pour tout cela il est important de développer de nouveaux outils pour créer manipuler et partager du contenu 3D. Le chapitre présente une architecture de communication hybride permettant de faciliter la transmission des objets 3D en temps réel de manière transparente pour l'utilisateur. La création d'EVC 3D sur le web à besoin de nouvelles architectures tirant partie des nouveaux standards du World Wide Web Consortium (W3C). Puis, le chapitre présente deux contributions reposant sur l'architecture cliente de 3DEvent pour manipuler des objets 3D avec une grande traçabilité et de manière autonome. Finalement, le chapitre adresse le problème et la spécificité de la transmission du contenu 3D lors de session collaborative en temps-réel. En considérant et développant un modèle orienté événements, 3DEvent dérive des stratégies pour délivrer et obtenir une scène 3D en continu (*streaming* en anglais) en s'appuyant sur les différentes configurations matérielles, utilisateurs, réseaux.

# Chapitre 2

## Contexte

### Contents

---

<b>2.1</b>	<b>La collaboration</b>	<b>9</b>
2.1.1	Les systèmes collaboratifs	12
2.1.2	Les systèmes d'édition collaboratifs	12
<b>2.2</b>	<b>La collaboration 3D en accord avec l'évolution du web</b>	<b>12</b>
2.2.1	Introduction	12
2.2.2	Le web et le P2P : WebRTC	12
2.2.3	Le web et la 3D : WebGL	12
<b>2.3</b>	<b>Les architectures évènementielles pour la collaboration</b>	<b>12</b>
2.3.1	Sensibilisation lors de la collaboration	12
2.3.2	Intégration des contraintes métiers	12

---

## 2.1 La collaboration

La collaboration est souvent définie comme un processus récursif<sup>1</sup> où deux (ou plus) personnes (ou organisations) travaillent ensemble à la croisée de buts communs en partageant leurs connaissances pour apprendre et bâtir un consensus. La collaboration permet l'émergence de conceptions partagées dans la réalisation de visions partagées dans des environnements et des systèmes complexes. Les imbrications de chaque domaine et la transdisciplinarité sont acceptés comme dans le concept de pensée complexe. D'ailleurs, dans sa définition de la complexité, Edgar Morin fait référence au sens étymologique latin « *complexus* » qui signifie « ce qui est tissé ensemble » [Morin, 1990b]. La plupart des collaborations requièrent un élément dirigeant qui peut prendre une forme sociale (personne) au sein d'un groupe décentralisé et égalitaire (tout le monde au même niveau). L'élément dirigeant va souvent aider également trouver des consensus. La disponibilité des ressources peut également devenir un élément dirigeant dans la collaboration. Une équipe travaillant de manière collaborative peut concentrer plus de ressources, de reconnaissances et de récompenses lors d'une compétition comportant des ressources finies. La collaboration est aussi présente dans la recherche de buts opposés mettant en avant la notion de collaboration contradictoire (en opposition avec la collaboration constructive) ; la négociation et la compétition peuvent également faire partie du terrain de la collaboration.

Une application collaborative peut aussi intégrer les notions de coordination et de coopération :

- La **coordination** se base sur le principe d'harmonisation des tâches, des rôles et du calendrier dans des systèmes et environnements simples.
- La **coopération** permet de résoudre des problèmes dans des systèmes et environnements complexes dans le les participants aurait été incapables (temps, espace, connaissance, matériel) d'accomplir le travail seul.

Dans les années 2000, deux classifications ont été retenue concernant la collaboration. La première classification, décrite en 2007 par Gotta [Gotta, 2007], propose un modèle segmentant la collaboration de manière structurée en quatre catégories : de la plus dirigée à la plus volontaire, en passant par l'hybride.

---

1. Le « principe de boucle récursive » se retrouve dans le concept de la pensée complexe. Edgar Morin explique qu'« un processus récursif est un processus où les produits et les effets sont en même temps causes et producteurs de ce qui les produit » [Morin, 1990a, p. 100].

- *Collaboration centrée processus.* Les conditions requises du processus nécessitent l’engagement de l’utilisateur, qui doit, de part son rôle ou sa responsabilité, diriger ses efforts dans la collaboration avec les autres. Cette stratégie se concentre sur les activités de manipulation collaborative 3D plutôt que sur leur contexte organisationnel afin de favoriser la synergie autour de la réussite d’un processus. Par exemple, pour la création et l’utilisation d’un modèle 3D dans un [BIM](#), il s’agit de favoriser la prise de décision sur un projet et communiquer à propos.
- *Collaboration centrée activité* Les activités partagées créent un sentiment de co-dépendance qui motive la collaboration entre les membres. La co-dépendance prend l’avantage sur le propre intérêt de chacun comme motivation pour collaborer. Le groupe a besoin de chacun pour que l’objectif soit considéré comme réalisé. L’intérêt personnel ou l’allégeance à l’esprit d’équipe peut aussi promouvoir la collaboration. Par exemple, la visualisation collaborative des activités des différents contributeurs dans l’[EVC 3D](#) permet à chacun de rendre compte de ses réalisations. Ce type de collaboration doit beaucoup à l’ergonomie de l’activité qui insiste sur la différence entre le travail prescrit et le travail réel : la tâche et l’activité.
- *Collaboration centrée communauté.* La participation de la communauté à la collaboration induit la contribution. En effet, les interactions professionnelles ou sociales peuvent encourager ou persuader les utilisateurs de partager leurs informations ou connaissances (exemple : les logiciels *open-source*)
- *Collaboration centrée réseau.* Les connexions réseau favorisent la coopération réciproque. Dans le but de récupérer des avis ou du savoir faire externe, un utilisateur peut faire appel à son réseau social pour compléter une autre interaction collaborative. Souvent utilisé dans le cadre d’urgences écologiques ou sanitaires (exemple : contributions OpenStreetMap lors d’ouragan ou de tsunami), la collaboration centrée réseau est très présente dans des situations l’expertise est fortement valorisée comme dans les [BIM](#) ou la visualisation scientifique, les contributeurs peuvent être intégrés en fonction des besoins des utilisateurs déjà présents sur le projet.

Dans le cadre de cette thèse, en se référant à cette première classification, les aspects centrés sur les activités sont mis en avant. En effet, la collaboration portant sur la modélisation 3D attend un résultat porté sur l’activité de conception. Celle-ci nécessite l’implication de personnes avec différentes compétences / connaissances qui

doivent s'entraider pour parvenir à la mise en commun des objets 3D et réaliser leur objectif.

Une seconde classification proposée par Callahan et al. [Callahan *et al.*, 2008] s'intéresse au triplé collaboration par équipe, collaboration communautaire, collaboration en réseau. En contraste avec la précédente classification qui se concentre sur les équipes et une collaboration formelle et structurée, celle-ci offre plus d'ouverture :

- *Collaboration par équipe.* Dans une équipe tous les membres se connaissent. Il y a une interdépendance claire des tâches à effectuer où la réciprocité est attendue, avec un échéancier et des objectifs explicites. Pour réaliser son but, l'équipe doit réaliser les tâches dans un temps imparti. La collaboration par équipe suggère que les membres coopèrent sur un pied d'égalité (bien qu'il y ait souvent un chef) recevant une reconnaissance égale.
- *Collaboration communautaire.* L'objectif de ce type de collaboration est plus orienté sur la possibilité d'apprendre que sur la tâche elle-même, même si les centres d'intérêt sont partagés par la communauté. Les utilisateurs sont là pour partager et construire la connaissance plus que compléter un projet. Les membres vont aller voir leur communauté pour demander de l'aide sur un problème ou un avis et ramener la solution à implémenter dans leur équipe. L'adhésion peut être limitée et explicite, mais les périodes de temps sont souvent ouvertes. Les membres sont considérés comme égaux bien que les plus expérimentés peuvent avoir des statuts privilégiés. La réciprocité est un facteur important dans la communauté pour que cela fonctionne.
- *Collaboration en réseau.* La collaboration en réseau est une sur-couche de la collaboration traditionnellement centrée sur la relation d'une équipe ou d'une communauté. Elle s'appuie sur une action individuelle et un intérêt personnel qui resurgissent ensuite sur le réseau sous la forme de personnes qui contribuent ou cherchent quelque chose à partir du réseau. L'adhésion et les périodes sont ouvertes et non limitées. Il n'y a pas de rôle explicite. Les membres ne se connaissent pas forcément. Le pouvoir est distribué. Cette forme de collaboration est dirigée par l'avènement des réseaux sociaux, des accès à internet omniprésents et la capacité de se connecter avec divers individus malgré la distance.

Cette thèse, en se référant à cette seconde classification, s'intéresse plutôt sur la collaboration par équipe. La conception d'un objet 3D et ses différentes phases de modélisation constitue une problématique nécessitant l'apport de plusieurs intervenants

avec leurs capacités propres et travaillant de concert à la réalisation d'un objectif commun dans un temps imparti (exemple : revue de projet). Là où la coopération et l'effort conjoint pour réaliser un objectif sont nécessaires, le facteur temps reste un élément important à prendre en compte pour évaluer la productivité d'une session collaborative.

Le travail dans un [EVC 3D](#) facilite la compréhension de certaines problématiques liées à l'espace 3D ; c'est également un point de rencontre et d'échanges entre contributeurs sur le court terme et le long terme. Le croisement de ces deux dimensions, spatiale et temporelle, implique une multiplication des points de vue et donc des données à traiter sur le problème lors de la collaboration.

### **2.1.1 Les systèmes collaboratifs**

### **2.1.2 Les systèmes d'édition collaboratifs**

Modèle d'édition collaborative

## **2.2 La collaboration 3D en accord avec l'évolution du web**

### **2.2.1 Introduction**

### **2.2.2 Le web et le P2P : WebRTC**

### **2.2.3 Le web et la 3D : WebGL**

## **2.3 Les architectures évènementielles pour la collaboration**

### **2.3.1 Sensibilisation lors de la collaboration**

### **2.3.2 Intégration des contraintes métiers**

# Chapitre 3

## État de l’art

### Contents

---

<b>3.1</b>	<b>Modélisation 3D collaborative sur le Web . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Communication en temps-réel . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Systèmes d’édition collaborative . . . . .</b>	<b>21</b>
3.3.1	Le modèle de cohérence CCI . . . . .	21
3.3.2	Les approches pour les données 3D . . . . .	21
3.3.3	Conclusion . . . . .	21
<b>3.4</b>	<b>Les systèmes évènementiels distribués pour la collabo- ration . . . . .</b>	<b>21</b>
3.4.1	Introduction . . . . .	21
3.4.2	Domain Driven Design : lier le fonctionnel et le code . . .	21
3.4.3	Command Query Responsibility Segregation : garantir de l’intégrité des données . . . . .	22
3.4.4	Event Sourcing : certifier la fiabilité et traçabilité des données	23
3.4.5	Conclusion . . . . .	28

---



## 3.1 Modélisation 3D collaborative sur le Web

L'arrivée du web a bouleversé les usages liés à la collaboration sur des objets 3D. Les principes, les technologies, l'omniprésence du web en ont fait une plateforme de prédilection pour la visualisation et la manipulation d'objet 3D de haut niveau. Pour les projets d'[Architecture, Ingénierie et Construction \(AIC\)](#) ou de [BIM](#), la demande de traitement et la fidélité ont tendance à être plus élevés, particulièrement pour la représentation de dessins d'ingénierie ou de modèles d'architecture 3D. Les objets simples (primitives) ou les maillages optimisés pour le rendu temps-réel ne sont ni suffisants ni assez génériques pour être supporté par tous les processus liés à l'élaboration d'un produit. Plus les projets sont gros, plus ils dépendent d'une multitude de logiciels 3D – dont l'interopérabilité n'est pas garantie – s'adressant chacun aux besoins d'une tâche spécifique. Chaque tâche (ex : modélisation [CAO](#), *stress testing*...) possède sa propre représentation des données qui peut varier selon les niveaux de sémantique attachés à la géométrie. Pour garder une trace de ces données et mettre en commun les données générées autour d'un produit, l'utilisation d'un [Product Data Management \(PDM\)/Product Lifecycle Management \(PLM\)](#) est souvent requise. Bien que certains outils de création d'objets 3D (par exemple Autodesk Revit) autorisent la synchronisation de fichier via leur dépôt à distance, ce n'est généralement pas applicable aux générations suivantes. En cela, une plateforme web pour un [PDM/PLM](#) à l'avantage d'être distribuée pour être accessible depuis un navigateur web ; avec un système d'édition hors-ligne, le téléversement peut s'avérer long et fastidieux. De plus, les logiciels spécialisés pour la modélisation 3D, contrairement aux jeux multijoueurs, sont traditionnellement dédiés à un utilisateur unique sans représentation visuelle des autres opérateurs dans le même espace 3D. Ici encore, les principes d'accessibilité du web facilitent la création d'un espace virtuel 3D collaboratif pour la visualisation, la manipulation et l'échange de données partagées.

La collaboration en temps-réel est de plus en plus présente sur le web pour différents types de documents notamment 3D. La revue sur la visualisation distribuée, effectuée par Grimstead et al. en 2005 [[Grimstead et al., 2005](#)], indique que la plupart des systèmes sont conçus pour moins de cent utilisateurs simultanés et reposent sur un ou plusieurs serveurs pour supporter ces utilisateurs. Ils expliquent ce schéma par la volonté du fournisseur de service d'assurer une qualité de service et la sécurité du système. Les systèmes de [Réalité Virtuelle \(RV\)](#) collaboratifs font exception à ce schéma où l'utilisation des réseaux [P2P](#) est plus répandue pour supporter parfois plus d'un millier d'utilisateurs simultanés. Dans chacun des cas, chaque système a besoin

d'un client adapté pour opérer de manière isolée sans inter-opérer avec les autres systèmes. C'est dans ce contexte qu'en 2011, Mouton et al. [Mouton *et al.*, 2011] présentent une analyse approfondie de l'état des environnements collaboratifs 3D, ciblant principalement la visualisation collaborative. Ils montrent l'apparition de la tendance à déporter les environnements collaboratifs sur le web grâce à l'évolution d'XMLHttpRequest en client-serveur et l'apparition du standard HTML5 comprenant un support avancé de l'audio et de la vidéo ainsi que plusieurs [Application Programming Interface \(API\)](#) de stockage côté client (LocalStorage, IndexedDB). Les applications web revêtent plusieurs avantages par rapport aux applications natives sur mobiles ou aux logiciels autonomes. Cela repose principalement sur le fait que les navigateurs sont présents partout dans nos vies aujourd'hui (2017), incluant les téléphones intelligents et les tablettes qui les rendent indépendants des plateformes utilisées. Le déploiement sur le web ne requiert pas d'installation ou de mises à jour autre que celle du navigateur (en ne considérant que les applications sans greffon). La modification de l'application est gérée de manière centralisée par les serveurs qui distribuent l'application. Les éditeurs peuvent diffuser leur application à l'échelle mondiale instantanément et la mettre à disposition des utilisateurs sans dépendre d'un réseau de distribution autre qu'internet.

Parmi les solutions sans greffon (*plugin less*), beaucoup sont développées pour faire de la modélisation 3D et utilisent l'architecture client-serveur et le protocole [WebSocket](#) pour effectuer la synchronisation entre les différents clients collaborateurs. Quelques raisons peuvent expliquer cette situation :

1. développement : connaissance du standard [WebSocket](#) par les développeurs (historique)
2. gestion des données : simplification de la synchronisation des données (centralisé)
3. suivi de l'utilisateur : dépendance de l'utilisateur vis à vis de la connexion au serveur et donc du service (engagement)

Parmi les solutions commerciales comme OnShape, Clara.io et TinkerCAD le choix de plateformes web dans l'infonuagique pour la modélisation [CAO](#) est prépondérant souvent assorti d'un gestionnaire de version et d'une plateforme de diffusion des créations. OnShape est un service de modélisation 3D très riche dont l'objectif est de proposer une qualité équivalente des fonctionnalités de modélisateurs autonomes (*standalone*) professionnels, le tout de manière collaborative. Leur approche de la gestion de version développe le concept de micro version [Baran, 2015]. Cette ap-

proche se retrouve dans les travaux de [Lu *et al.*, 2016] qui l'utilise gérer l'évolution de productions participatives liées à des tâches de modélisation 3D en utilisant la créativité, l'intelligence et le savoir-faire d'un grand nombre de personnes en sous-traitance (*crowdsourcing*). Le modelleur 3D Clara.io [Houston *et al.*, 2013] est plus généraliste. Il s'oriente davantage vers des fonctionnalités avancées de rendu 3D sur le *cloud* en utilisant du lancer de rayons. Les fonctionnalités d'historisation et de collaboration proposées dans Clara.io restent très basiques (seulement annuler / refaire). TinkerCAD est aussi une plateforme de publication d'objets 3D pour faciliter l'accès à la conception d'objets 3D. TinkerCAD est une application destinée au grand public pour la conception et l'impression 3D. De ce fait, les fonctionnalités sont limitées à cause du métier, l'impression 3D et de la cible, grand public. La gestion de version est donc plus légère, similaire à celle proposée par Clara.io. OpenJSCAD, Verold Studio, Vectary sont d'autres exemples de modelleurs 3D moins connus avec des fonctionnalités proches de TinkerCAD. Un peu à part, GrabCAD est une plateforme web plus orientée sur la gestion de données 3D CAO (PLM) qui possède un système de gestion de version performant et un système d'annotation et de visualisation collaborative. Pour réduire l'empreinte mémoire des messages transmis lors de la collaboration sur le web, certains systèmes d'édition collaborative de contenu 3D utilisent une modélisation par surface implicite (BlobTree) [Grasberger *et al.*, 2013]. Les objets sont alors manipulés comme des géométries de construction de solides avec les opérations booléennes associées. Le Tableau 3.1 résume les différents types d'encodage associé au type de modélisation 3D.

Tableau 3.1 – Encodage des données transmises

Référence	Modélisation 3D	Encodage des modifications
[Grasberger <i>et al.</i> , 2013]	Blob (CSG)	Fonction implicite
Clara.io [Houston <i>et al.</i> , 2013]	Polygonale	Commande interface
[Mouton <i>et al.</i> , 2014]	Polygonale	Fonction paramétrique
OnShape [Baran, 2015]	Paramétrique	Microversion
cSculpt [Calabrese <i>et al.</i> , 2016]	Polygonale	Fréquence spatiale

La plateforme web possède certains avantages par rapport à des clients lourds. En effet, le développement de l'infonuagique a permis le développement de meilleures infrastructures de services. Du fait de ce développement, la création de plateformes collaboratives sur le web pour faire de la conception 3D est devenue non seulement faisable en termes de ressources mais également en termes de technologie. Il existe

deux types d'approches pour créer du contenu web 2D ou 3D. L'approche déclarative et l'approche impérative. La Figure 3.1 montre le pendant 3D pour chaque approche 2D. En 2D, les spécifications déclaratives ([Scalable Vector Graphics \(SVG\)](#)) et impératives ([canvas](#)) sont issues du [HyperText Markup Language \(HTML\)](#)<sup>5</sup> alors qu'en 3D, les spécifications sont encore en évolution.



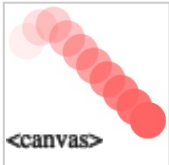

	2D (final HTML5 spec)	3D (No final W3C spec)
<b>Déclaratif</b> Graphe de scène Partie du HTML-document Intégration DOM CSS/ Evènements		
<b>Impératif</b> API procédurale Contexte de dessin		

FIGURE 3.1 – Déclaratif vs Impératif en 2D et en 3D sur le web

L'approche déclarative (Dec3D) s'intègre au [Document Object Model \(DOM\)](#) et se focalise sur l'utilisation des technologies du web existantes comme CSS3, [HTML5](#) et l'Ajax. X3D est ainsi un format de fichier respectant le standard ISO [W3C, 2011] pour représenter des scènes 3D interactives en XML, rétro-compatible avec VRML97. Il se différencie des formats de fichier type Collada en intégrant le comportement de la scène durant l'exécution en plus de la description du contenu 3D. Les deux bibliothèques les plus notables dérivées de ce standard sont X3DOM [Behr *et al.*, 2010] et XML3D [Sons *et al.*, 2010] : toutes les deux sont capables de supporter les récentes avancées de WebGL pour afficher une scène décrite dans le [DOM](#) à l'intérieur d'un *canvas* [HTML5](#). X3DOM essaye de respecter le standard X3D et ses concepts pour en permettre l'intégration du format dans le [DOM](#). De plus, X3DOM intègre le support d'élément [HTML](#), les événements [DOM](#) et de profils [CSS](#) en supplément [Sutter, 2015]. En comparaison avec X3DOM, XML3D a développé une extension à [HTML5](#) pour décrire une scène 3D. L'utilisation d'un langage déclaratif basé sur XML comme X3D est bien adapté pour le contenu 3D utilise des données CAO/MAO ou WCS dans des applications [Système d'Information Géographique \(SIG\)](#) car il peut être directement transformé (ex. XSLT) d'une représentation à une autre (tout comme le X3D peut être rendu dans un navigateur en utilisant X3DOM).

L'approche déclarative est utilisée dans de nombreux travaux de visualisation scientifique 3D distribuée [Jung *et al.*, 2012] pour des données spatiales [Stein *et al.*, 2014] ou du rendu volumique [Becher, 2012] par exemple. En manipulant directement les objets 3D à partir des éléments DOM, grâce à sa structure bien connue, il est alors plus simple lors de la collaboration d'utiliser ces éléments [Gadea *et al.*, 2016] ou les événements du DOM [Lowet et Goergen, 2009] comme protocole de synchronisation de scènes. L'ajout de nombreux *listeners* sur un document peut affecter les performances de parcours de l'arbre du DOM notamment si une scène très peuplée.

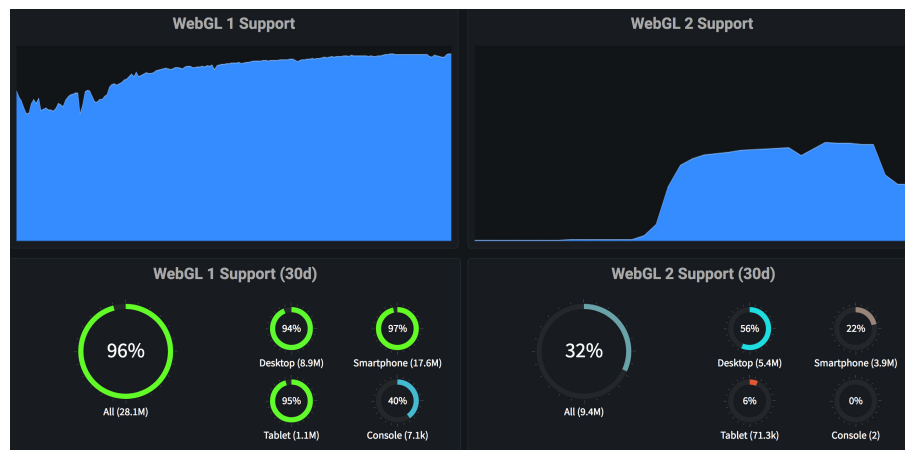


FIGURE 3.2 – Support de WebGL 1 (2014-2017) et WebGL 2 (2016-2017)

Concernant l'approche impérative, la spécification WebGL 1.0 [Khronos, 2011] proposée par le groupe Khronos permet aux navigateurs d'effectuer un rendu 3D grâce à une API JavaScript adaptée de l'API d'OpenGL ES 2.0 [Khronos, 2007] en utilisant l'élément *canvas* d'HTML5. Cette spécification est supportée par la plupart des navigateurs traditionnels (Chrome depuis v49, Firefox depuis v52, Safari depuis v9.1, IE 11<sup>1</sup>, Edge 14<sup>1</sup> et Opera depuis v41) ainsi que les navigateurs mobiles (iOS Safari depuis v9.3, Android Browser depuis v53 et Chrome for Android depuis v53) à l'exception d'Opera Mini<sup>2</sup>. La spécification WebGL 2.0 [Khronos, 2016] basée sur OpenGL ES 3.0 [Khronos, 2008], déjà publiée en tant que brouillon, est en phase expérimentale<sup>3</sup>. La Figure 3.2 montre l'évolution du support de WebGL 1 et WebGL 2 durant ces dernières années sur les différentes plateformes possédant un navigateur web<sup>4</sup>.

1. Le contexte WebGL est accessible depuis « `experimental-webgl` » au lieu de « `webgl` ».

2. Données issues de <http://caniuse.com/#search=webgl>, consulté le 26/11/2016.

3. <http://caniuse.com/#feat=webgl2> consulté le 26/11/2016

4. Images capturées sur <https://webglstats.com/>. Les statistiques sont collectées à partir de sites partenaires de [webglstats.com](https://webglstats.com). Ces sites sont en ciblant des néophytes de la WebGL possédant donc le matériel dédié à la 3D en général. Consulté le 04/07/2017.

## 3.2 Communication en temps-réel

L'expression temps-réel est largement utilisé par des applications requérant une forme de temps de réponse rapide et réactif pour que l'utilisateur ait une bonne expérience.

L'exigence vis-à-vis des temps de réponse est de plus en plus grande pour deux raisons principales : les limitations humaines (mémoire et attention limitées à court terme) et les aspirations de l'être humain (besoin d'être en contrôle sur les machines). S'accroissant au gré de la technologie et aux attentes utilisateurs (rétro-compatibilité, temps de chargement), elle varie selon le domaine mais reste très assez prégnante sur le web en général. Par exemple, dans un domaine annexe comme le e-commerce, une étude réalisée en 2006 explique qu'une grande partie des internautes abandonnaient leurs achats en ligne si les pages mettaient 4 secondes ou plus à charger. De nos jours, ce délai a été réduit au quart de seconde pour les grandes entreprises du web. Jakob Nielsen [[Wikipedia, 2013](#)] indique trois temps de réponse limites concernant les temps de réponses :

- *0,1 seconde* donne une sensation de réponse instantanée, comme si le résultat avait été produit par l'utilisateur et non l'ordinateur. Ce niveau de temps de réponse soutient la sensation de manipulation directe.<sup>5</sup>
- *1 seconde* garde le flux de pensées de l'utilisateur sans interruption. L'utilisateur peut ressentir un délai et par conséquent savoir que c'est la machine qui génère le résultat ; l'utilisateur a quand même une impression de contrôle sur l'expérience générale et peut de déplacer librement dans l'interface sans attendre la machine. Ce degré de réactivité est impératif pour une bonne navigation.
- *10 secondes* conservent l'attention de l'utilisateur. Entre 1 et 10 secondes, l'utilisateur se sent dépendant de la machine, mais peut faire avec. Au delà, l'utilisateur va commencer à penser à d'autres choses, rendant difficile le retour à la tâche une fois que la machine répond.

Dans le domaine de l'édition et la manipulation collaborative d'objets 3D, les contraintes abordées se situent à divers degrés : au chargement et lors des mises à jour. Le chargement concerne la phase de téléchargement de l'application web et des données relatives mais également d'affichage des modèles 3D sont spécifiques dans ce

---

5. En IHM, la manipulation directe correspond à un mode d'interaction au cours duquel les utilisateurs font des actions sur les objets d'intérêt affichés dans l'interface utilisateur en utilisant des actions physiques, incrémentales et réversibles dont les effets sont immédiatement visibles sur l'écran.

domaine car ils ont tendance à être lourds (structure de données 3D et métadonnées) à charger (contrairement au texte par exemple). Cette phase peut s'accorder des délais relativement long (1-10s) compte tenu du fait que l'utilisateur connaît en partie ces contraintes liées à la taille des objets 3D. Concernant les mises à jour, l'édition collaborative requiert un temps de réponse raisonnablement court est contraint par l'exactitude des calculs et le temps dans lequel le résultat est produit. Pour les mises à jour internes – produites par l'utilisateur, actions sur l'interface – on s'accordera sur un délai inférieur à 0,1 seconde dans cette thèse. Pour les mises à jour externes – produites par les collaborateurs – les latences réseaux rentrent en comptes (serveur, pairs. . .) on s'accordera sur un délai entre 1 et 10 secondes dans cette thèse selon les degrés d'asynchronicité possible.

Un protocole de communication en temps-réel existe, il s'appelle [Real-Time Transport Protocol \(RTP\)](#) et a été développé dans le but de faciliter la communication en temps-réel sur un réseau. Coexistant avec [RTP](#), le protocole [Real-time Transfert Control Protocol \(RTCP\)](#) est utilisé pour transmettre des informations de contrôle à propos des données en temps-réelles. [RTCP](#) transporte des données contenant des informations de contrôle et des informations statistiques concernant les flux de données et les connexions des destinataires qui permettent à l'expéditeur d'ajuster le flux en conséquence. Les protocoles [RTP](#) et [RTCP](#) sont principalement conçus pour la transmission de flux audio et vidéo, moins pour des données arbitraires comme des données 3D. Pour cette raison, leur utilisation est limitée dans le cadre des [Environnement Virtuel Collaboratif \(EVC\)](#) pour la modélisation 3D.

Du fait de la variété des [EVCs 3D](#) existants, LE protocole de communication parfait pour tous les types d'environnement n'existe pas. Les besoins en communication qui se formulent souvent en termes de fiabilité de la livraison des messages et de l'ordonnancement des messages sont les variables d'ajustement en fonction des contraintes qu'imposent les limites de temps de réponse et de bande passante.



## 3.3 Systèmes d'édition collaborative

### 3.3.1 Le modèle de cohérence CCI

### 3.3.2 Les approches pour les données 3D

### 3.3.3 Conclusion

## 3.4 Les systèmes évènementiels distribués pour la collaboration

### 3.4.1 Introduction

Les évènements comme base du comportement réactif

Systèmes Publish / Subscribe

Outils de monitoring et de benchmark

### 3.4.2 Domain Driven Design : lier le fonctionnel et le code

[Domain Driven Design \(DDD\)](#) (ou Conception Pilotée par le Domaine) est une approche de développement logicielle qui a pour objectif de définir une vision et un **langage partagé** (*ubiquitous language*) pour les personnes impliquées dans la construction d'une application [[Evans, 2003](#)].

Le but est de mettre l'accent principal d'un projet sur le domaine et la logique du domaine en basant des conceptions complexes sur un modèle du domaine afin d'initier une collaboration créative entre les experts techniques et les experts du domaine pour raffiner itérativement un modèle conceptuel qui relève de problèmes spécifiques au domaine. Les différents concepts du [DDD](#) sont listés en suivant :

**Le contexte** est le cadre dans lequel un mot apparaît qui détermine sa signification

**Le domaine** est une ontologie, une influence, ou une activité. L'étendue du sujet auquel l'utilisateur applique un programme est le domaine du logiciel

**Le modèle** est un système d'abstraction qui décrit les aspects sélectionnés du domaine et qui sont utilisés pour résoudre les problèmes liés à ce domaine

**Le langage partagé** est un langage structuré autour du modèle du domaine utilisé par tous les membres de l'équipe pour faire référence aux activités de l'équipe permettant d'éviter la redondance et les ambiguïtés dans un contexte donné.



Le [DDD](#) permet de connecter le modèle et son implémentation en offrant plusieurs avantages :

- La plasticité du système est mise en avant par l’expression de règles et de comportements qui facilitent les changements fréquents.
- L’accent mis sur l’identification des interactions dans le système encourage la mise en œuvre d’une interface orientée tâches (*task-based UI*).
- La testabilité fonctionnelle est intégrée via les règles métier explicitées et concentrées dans une couche spécifique de l’application. Cela les rend plus facilement identifiable et testable automatiquement.
- La robustesse est améliorée face aux changements dans le SI.

Les notions plus détaillées qui se rapportent au [DDD](#) sont présentées dans [Evans, 2003] et [Vernon, 2013].

Le [DDD](#) a également l’avantage de fonctionner en harmonie avec les principes de l’[Event Sourcing \(ES\)](#). L’approche logicielle [DDD](#) étant conçue pour refléter les évènements se déroulant dans la réalité métier qui ne sont pas interchangeables – la plupart du temps. L’utilisation d’architectures basées évènements est naturelle dans ce genre d’environnement.

Les disciplines liées à la 3D dans un contexte industrielles ont besoin de pouvoir communiquer sur un langage commun pour permettre à chacun des intervenants de s’exprimer dans la création du produit. Par exemple, la [CAO](#) est très utile dans un contexte d’ingénierie par l’utilisation de quatre propriétés fondamentales telles que l’historique, les fonctionnalités, la paramétrisation et le haut niveau de contrainte.

**Programmation réactive** Les différents livres publiés par Vaughn s’attachent également à montrer la nécessité pour les différentes branches de l’informatique à proposer des systèmes pour robustes et flexibles face aux nouvelles demandes. La publication du Manifeste Réactif encourage le développement de systèmes « plus flexibles, à couplage faible et extensibles ».

### 3.4.3 Command Query Responsibility Segregation : garantir de l’intégrité des données

Introduit par Greg Young en 2009 [Young, 2009], [Command Query Responsibility Segregation \(CQRS\)](#) est un patron de conception qui repose sur le principe de séparation des composants de traitement métier de l’information (écriture) et de la

restitution de l'information (lecture). Le cadre offert par ce principe permet de lever certaines contraintes d'architecture comme la (*scalability*) en faisant apparaître de nouvelles forces : la gestion de la concurrence dans la collaboration sur des règles métier propre à la modélisation 3D dans des cadres d'application spécifiques. En effet, selon le type d'application des règles vont régir qui peut effectuer quelle type de modification ou quelles sont les modifications qui peuvent être acceptables dans un cas et non dans un autre. Le caractère vicié (*staleness*) d'une donnée dans un environnement collaboratif est récurrent. Une fois que la donnée a été montrée à un utilisateur, la même donnée peut être changée par un autre utilisateur, elle est altérée. **CQRS** pallie cela en répondant aux besoins suivants :

- En traitement/ écriture : besoins transactionnels, garantie de cohérence (*consistency*) des données, de normalisation.
- En consultation/lecture : dénormalisation, scalabilité.

La plupart des architectures en couches ne font pas explicitement référence à ces problèmes. Le fait de tout sauvegarder dans une base de données centralisée peut être une étape dans la gestion de la collaboration mais l'altération des données est souvent exacerbée par l'utilisation de caches comme accélérateur de performance.

L'**immuabilité** en **CQRS** est un concept clé qui prévient la modification de l'état interne d'une commande ou d'un évènement. Les commandes sont immuables car leur usage nécessite un envoi direct au domaine pour être traitées. Quant aux évènements, ils sont immuables car ils représentent ce qui s'est produit dans le passé (qu'on ne peut donc pas changer).

#### 3.4.4 Event Sourcing : certifier la fiabilité et traçabilité des données

L'**ES** est une approche complémentaire au **CQRS** pour gérer la concurrence des données et capturer l'intention de l'utilisateur. Ce patron de conception stocke les évènements en mode ajout seulement (*append-only*) pour sauvegarder le résultat des commandes sur le domaine. Cela permet de conserver tous les changements qui ont mené à un état plutôt qu'uniquement l'état. Ce paradigme permet de recréer n'importe quel état d'un agrégat à partir de la liste d'évènements qu'on lui a appliqué. Cette liste représente une base la vérité du système. **ES** permet de simplifier les tâches complexes dans des domaines complexes comme la 3D en ne requérant pas la synchronisation de modèle de données et du métier.

L'**ES** est souvent présent dans des architecture asynchrones qui ont l'avantage de pouvoir utiliser des queues de message, plusieurs bases de données et où la partie lecture est éventuellement consistante. La plupart de la littérature concernant ce patron se trouve en ligne, dans des billets de blog, des présentations, ou de la documentation logicielle. La littérature académique est relativement réduite, souvent rapproché des travaux sur l'évolution de graphes. Cette section fournit un aperçu des différentes définitions données de l'**ES** et du vocabulaire lié à ce patron de conception.

**Martin Fowler** Martin Fowler a été le premier à utiliser le terme d'**Event Sourcing** en 2005. Il définit l'**ES** comme « une série de changements de l'état d'une application ». « série d'évènements capture tout ce qui est nécessaire à la reconstruction de l'état courant' ». Il voit les évènements comme immuables et le journal d'évènement (*event log*) comme un stockage linéaire (*append only store*) des évènements. Les évènements ne sont jamais supprimés, le seul moyen de l'"annuler" consiste à effectuer générer un évènement rétroactif. Une fois qu'un évènement rétroactif est ajouté, l'évènement rétroactif agit à l'inverse de l'évènement précédent pour compenser ses effets. Dans ce billet, Fowler n'établit pas clairement la distinction entre les évènements et les commandes qui déclenchent ces évènements. Ce problème est considéré dans plusieurs travaux.

**Greg Young** Auteur renommé dans le domaine de l'**ES**, Greg Young décrit l'**ES** comme « le stockage de l'état courant sous la forme d'une série d'évènements et la reconstruction de l'état du système en rejouant cette série d'évènements' ». D'après lui, le journal d'évènements a également un comportement linéaire : les évènements qui sont déjà arrivés ne peuvent être défaits. Ce que Fowler appelle évènements rétroactifs, Young le décrit comme des actions inverses.

**Udi Dahan** Udi Dahan est également un auteur de billets de blog prolifique sur les systèmes **ES**. Dans sa définition de l'**ES**, Dahan insiste sur le fait que "l'état du modèle du domain est persisté comme un *flux* d'évènements plutôt qu'un simple instantané".

Les avantages et les inconvénients de l'approche **ES**, incluant et discutant notamment ceux relevés par [Klamer, 2013].

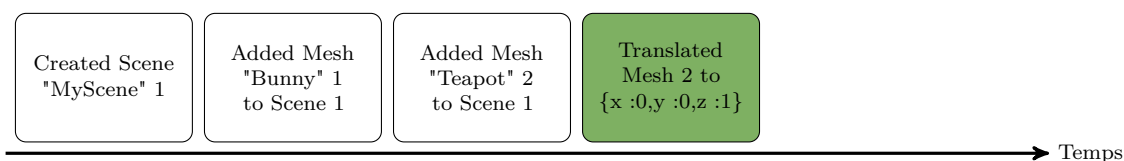


FIGURE 3.3 – Transaction en Event-Sourcing

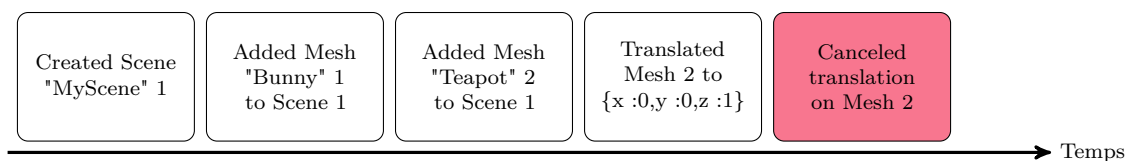


FIGURE 3.4 – Transaction avec compensation en Event-Sourcing

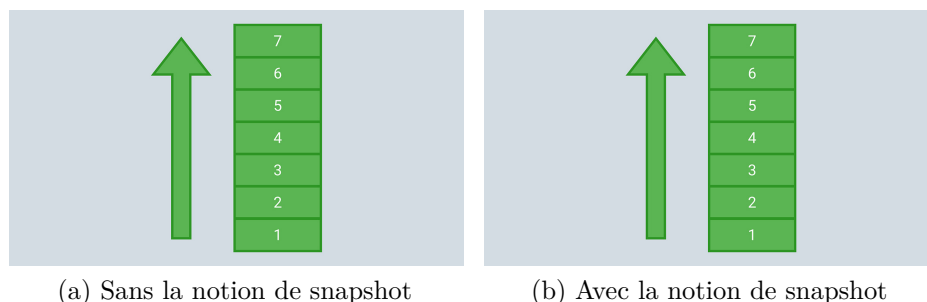


FIGURE 3.5 – Snapshot en Event-Sourcing

### Avantages

L'ES peut apporter beaucoup d'avantages à une application, notamment lorsque les besoins en traçabilité de l'information sont importants comme dans la modélisation collaborative de données 3D. L'historique du système est accessible tout au long de la vie de l'application ce qui implique qu'il est non seulement possible d'accéder à l'état courant du système, mais également toutes les actions ayant mené jusqu'à cet état. C'est un avantage certain pour les systèmes critiques, les applications d'Informatique Décisionnelle ([Business Intelligence \(BI\)](#)) ou les applications collaboratives. La pratique la plus courante est de proposer un système principal et d'ajouter une multitude de sous-systèmes qui enregistrent les différentes métriques (analyse d'un ou plusieurs axes, *reporting* sur une propriété) du système principal. Avec l'ES, il est toujours possible de regarder «dans le passé» et récupérer les données à partir de ce moment. Par comparaison, les avantages de l'ES sur l'Active Record sont :

- un journal complet de tous les changements d'état,
- une traçabilité et un débogage efficace,
- de très bonnes performances,
- pas de mapping objet-relationnel (ORM).

**Exemple** Une revue de projet d'une scène est effectuée dans le cadre d'une application collaborative de modélisation 3D en ligne. Le chef de projet remarque qu'un objet a subi énormément de modifications par rapport aux autres. Il examine en

particulier cet objet pour en connaître les causes. Voici deux exemples d'observations possibles : 1/ les spécifications ne sont pas assez claires 2/ deux collaborateurs sont opposés sur la façon de modifier l'objet. L'origine de ces changements identifiée, le chef de projet pourra alors intervenir et clarifier le sujet.

**Résolution** Avec un système classique, la fonctionnalité doit être créée pour enregistrer ce traitement puis être testée et implémentée (dans cet exemple, il en faudrait deux). Seulement après, un rapport pourra être délivré. Dans un environnement utilisant l'ES, tous les évènements existent déjà donc les données sont déjà disponibles et ont seulement à être analysées (dans notre exemples, les informations sont inhérentes aux évènements). De plus, les évènements étant stockés depuis le début de la vie de l'application, beaucoup plus de données peuvent être analysées. On pourra par exemple demander toutes les modifications d'un objet depuis la dernière connexion d'un utilisateur pour lui communiquer visuellement les différences par rapport à sa dernière visite.

#### Inconvénients

Les performances de l'application peuvent être affectées par l'utilisation de l'ES. En effet, pour récupérer l'état courant à partir de l'Event Store, il est nécessaire de le calculer à partir des évènements reçus. A chaque évènement créé (et stocké), ce processus sera alourdi car ils ne peuvent être supprimés. Plus la pile d'évènements est longue, plus cela prend du temps (linéaire). On peut considérer d'une part que l'on a besoin des évènements que lorsque qu'une commande est effectuée. Un **Snapshot** est une capture de l'état de l'agrégat à un moment qui correspond à l'empilement d'évènements ayant mené à cet état. En créant un **Snapshot**, on évite de reconstruire un état à partir du début de la vie de l'agrégat ; on empile les nouveaux évènements à partir de ce snapshot. L'utilisation du **Snapshot** est intéressante à partir du moment où la pile d'évènements devient plus lourde que le **Snapshot** lui-même. Il est donc important de bien déterminer la périodicité du déclenchement du **Snapshot** (temporelle ou selon le nombre d'évènements).

Le parcours des évènements se fait classiquement du premier au dernier (*bottom-up*). Si on utilise les **Snapshot**, on peut se permettre de les parcourir dans l'autre sens (*top-bottom*) jusqu'à trouver un **Snapshot** puis appliquer tous les évènements qui sont arrivés entre ce **Snapshot** et l'état courant. Dans le cas où l'on souhaite accéder à des données historiques plus anciennes que le dernier **Snapshot**, le second parcours fonctionne aussi. Cependant, elle doit être évitée pour ne pas créer de dépendance

entre les [Snapshot](#). Sans les snapshots le modèle peut encore varier « librement » tant que l'on sait comment lui appliquer un évènement passé. Le fait de travailler avec des [Snapshot](#) crée une dépendance des snapshots qui doivent intégrer les modifications du domaine. Une solution est de recalculer les snapshots quand le domaine est modifié mais cela reste coûteux (et à éviter).

### Event sourcing vs command sourcing

Les patrons de conception [Command Sourcing \(CS\)](#) et [ES](#) sont strictement déterministes pour avoir une exactitude rigoureuse de ce qui se passe dans le système.

Un évènement représente quelque chose qui est arrivé dans le domaine. Un évènement appliqué sur un état, donne un nouvel état. La condition pour appliquer un pur déterminisme en [ES](#) est la fonction suivante :  $\text{State} \rightarrow \text{Event} \rightarrow \text{State}$ . Cette fonction met en correspondance les (mêmes) entrées avec les (mêmes) sorties, on peut se reposer dessus pour reconstituer un état à n'importe quel moment dans le temps. Le déterminisme est appliqué en assurant à l'évènement tous les informations lui permettant de faire la transition (i.e. sans effet de bord). L'évènement est alors considéré comme une encapsulation de toutes les informations pertinentes concernant la transition du système d'un état à l'autre.

Une commande va être déclenchée par l'utilisateur qui veut modifier le domaine. Une commande appliquée sur un état va produire un ou plusieurs évènements (qui ne sont pas forcément appliqués à l'état courant de l'application par la suite) :  $\text{State} \rightarrow \text{Command} \rightarrow \text{Event list}$

La différence principale entre un évènement et une commande réside donc dans l'**intention**. D'un point de vue fonctionnel, le [CS](#) est un patron de conception lié à une décision qui produit plusieurs évènements, tandis que l'[ES](#) se contente d'appliquer un changement à l'état courant. De plus, en [ES](#), l'évènement stocké a été produit par l'agregat. La différenciation majeure des deux patrons de conception s'accroît lors l'interaction avec des systèmes externes. L'aspect fonctionnel de l'application de changement d'état de l'[ES](#) a l'avantage de permettre de reconstruire l'état sans effets de bord car elle ne travaille que sur l'état interne de l'application.

Historiquement, l'[ES](#) de Fowler dans ses premières versions ressemblait plus à du [CS](#). L'évolution de l'[ES](#) a conduit à revoir ce patron théoriquement sous une forme fonctionnelle pure avec l'apparition de base de données comme EventStore ou le langage de programmation plus adaptés comme F#.

Les deux patrons peuvent cohabiter si le **CS** a un cadre d'action bien délimité et de les composants de l'architecture ont un couplage lâche afin que seuls les évènements produits par les agrégats ne modifient l'état interne de l'application.

### **3.4.5 Conclusion**

# Chapitre 4

## Contributions scientifiques

### Contents

---

<b>4.1</b>	<b>Modèle évènementiel pour l'intégration du domaine 3D lors de la manipulation d'objets 3D . . . . .</b>	<b>30</b>
4.1.1	Modèle général . . . . .	33
4.1.2	Mécanisme de gestion de version . . . . .	36
4.1.3	Cohérence Éventuelle en CQRS . . . . .	36
4.1.4	Potentielles applications et autres utilisations . . . . .	37
4.1.5	Bilan . . . . .	38
<b>4.2</b>	<b>Architecture de communication hybride . . . . .</b>	<b>38</b>
4.2.1	Présentation générale . . . . .	41
4.2.2	Event Store . . . . .	42
4.2.3	Persistance à long terme . . . . .	44
4.2.4	Synchronisation client-serveur . . . . .	44
4.2.5	Gestion de la cohérence . . . . .	45
4.2.6	Bilan . . . . .	45
<b>4.3</b>	<b>Conclusion du chapitre . . . . .</b>	<b>45</b>

---



Nous avons vu que les [EVC 3D](#) doivent considérer beaucoup de critères pour proposer un système réactif, robuste et permettant le passage à l'échelle en intégrant les contraintes liées à la gestion de données 3D. La dimension collaborative ajoute les problématiques de gestion de données concurrentes. En s'intéressant d'abord à au rapport des données à la 3D dans le contexte de l'assemblage d'objets 3D dans une scène partagée cela permet de mieux comprendre les fonctionnalités spécifiques à la 3D (transformations), l'historisation des données et leur visualisation. Les ressources nécessaires à la collaboration demandent une haute disponibilité et une forte réactivité. Ces besoins impliquent de mettre en place une architecture de communication répondant aux contraintes fonctionnelles (détection de conflit) et technologiques (web).

Ce chapitre présente les contributions scientifiques de cette thèse. Tout d'abord, on introduit le modèle orienté événements pour la visualisation et la manipulation d'objets 3D dans un environnement web. La contribution insiste sur l'intégration de la partie métier de la 3D par l'utilisation de patrons de conception ([DDD](#), [CQRS](#), [ES](#)) . La réflexion concernant le découpage des opérations 3D liées à la manipulation d'objets 3D est expliquée dans un premier temps. Dans un second temps, pour procurer plus d'autonomie aux utilisateurs, on propose de déporter le patron [CQRS](#) uniquement sur le client afin qu'il soit capable de gérer la partie métier seul. La valeur ajoutée par le modèle orienté événements ne permet pas l'échange entre les utilisateurs bien qu'elle soit pensée pour intégrer les aspects métiers de cette dernière. C'est pourquoi la seconde contribution s'intéresse à l'architecture de communication dans un environnement web. L'architecture hybride proposée repose sur une combinaison de l'architecture client-serveur et l'architecture P2P. Cela tient du fait que la centralisation de l'information est nécessaire dans un contexte industriel et que les propriétés du P2P permettent une haute disponibilité des ressources. Cette contribution est découpée en deux parties. La première concerne

## 4.1 **Modèle évènementiel pour l'intégration du domaine 3D lors de la manipulation d'objets 3D**

L'[event processing \(EP\)](#) occupe, dans le champ de l'informatique, une place centrale dans beaucoup de systèmes comme l'énergie, la santé, l'environnement, les transports, la finance, les services et l'industrie. L'[EP](#) réunit des méthodes et des outils pour filtrer, transformer, et détecter des motifs dans des événements, dans le

but de réagir à des conditions qui changent, généralement liées à des contraintes de temps [Chandy *et al.*, 2011]. L'EP intègre plusieurs fonctionnalités :

- Obtenir des données à partir de plusieurs sources en temps (quasi) réel
- Agréger et analyser ces données pour détecter des motifs qui indiquent la présence de situation critiques qui nécessitent une réponse
- Déterminer la réponse la plus adaptée à ces situations
- Surveiller (*monitor*) l'exécution de cette réponse

Le panorama d'applications et de technologies proposé par [Hinze *et al.*, 2009] permet de définir les termes et les interprétations communes à différents domaines se basant sur le paradigme de l'EP.

La méthodologie orientée événements intègre plusieurs aspects souvent laissés de côté dans la littérature concernant le développement des environnements virtuels collaboratifs pour la visualisation et la manipulation d'objets 3D. Par exemple, elle a l'avantage de proposer un couplage lâche. Dès lors, la réutilisation des données produites lors de la collaboration peut facilement être réutiliser pour un traitement secondaire comme la sensibilisation aux éléments de l'environnement.

Le découpage de la modélisation logicielle et l'abstraction qu'elle apporte est aussi l'occasion de s'intéresser à la façon dont sont générées les données produites par les utilisateurs et la façon dont elles sont affichées.

## Constat

Par nature, une architecture orientée événements est extrêmement peu couplée et hautement distribuée. Le créateur de l'évènement sait seulement que l'évènement se produit. Le créateur de l'évènement n'a aucune idée du traitement l'évènement va subir par la suite ou qui cela va concerner. La traçabilité peut donc devenir difficile lorsqu'un évènement empreinte de multiples chemin. C'est pourquoi les architectures orientée événements sont plus utilisées dans un contexte de flux d'information asynchrone.

Il existe différents types de traitement d'évènement : simple, en continu, complexe. Ils peuvent être utilisés ensemble dans le cadre.

- Traitement d'évènement simple. (*simple event processing*). Dans le traitement simple d'évènement, un évènement notable arrive, initiant une cascade d'actions. Le traitement simple d'évènement est généralement utilisé pour orienter un flux temps-réel qui peut prendre un peu de temps, n'entraînant pas de coût sur la partie métier.

- Traitement de flux continu d'évènement. (*stream event processing*).
- Traitement d'évènement complexe. (*complex event processing*).

Le choix de baser la gestion des données sur le patron de conception **CQRS** combiné à de l'**ES** repose sur le constat suivant : dans un cadre industriel, le besoin de traçabilité de l'information est très important.

**CQRS** est principalement utilisé sur des applications **CS** qui sont toujours connectées (pour récupérer les mises à jour). Ce fonctionnement ne permet pas le travail hors ligne.

Côté serveur, le stockage des données est de moins en moins cher, on peut donc se permettre de stocker beaucoup de données de manière distante notamment grâce au **cloud**. Le serveur a une puissance de calcul plus importante (et surtout ajustable).

Côté client, la puissance de calcul des machines sur lesquelles sont installés les navigateurs web évolue rapidement (notamment les appareils mobiles comme les *smartphones* et les tablettes). Les navigateurs suivent cette tendance en puisant dans ces ressources pour effectuer des traitements similaires à ceux que l'on trouve côté serveur traditionnellement et pour proposer des fonctionnalités avancées telles que le stockage important de données sur le client (IndexedDB, storageAPI), pour l'affichage 3D (WebGL) et pour la communication en **P2P** (**Web Real-Time Communication** (**WebRTC**)). En déportant ainsi la charge que pourrait subir une architecture traditionnelle client-serveur côté client, les échanges réseaux sont limités car qui sont très coûteux d'un point de vue énergétique pour les appareils mobiles [Koskela *et al.*, 2015]. De plus, l'utilisation de la bande passante est onéreuse et parfois limitée voire inexistante, il est donc nécessaire de tirer parti de tous les appareils participants à la collaboration au lieu de tout faire reposer sur le serveur. Chaque appareil participant à la collaboration doit être autonome et le plus indépendant possible en termes de ressources (données, réseaux, validation experte).

## Contribution

Pour répondre à cette problématique, nous proposons une solution pour la transmission des données 3D et collaboratives qui permet de limiter le nombre de requêtes et la taille des données transmises sans perdre la traçabilité de celles-ci. L'idée est de profiter de la puissance du client pour créer une architecture assurant l'autonomie de l'utilisateur en cas de déconnexion volontaire (travaille hors ligne) ou involontaire (coupure). On garantit ainsi à l'utilisateur l'utilisation du système avec

un historique performant où chaque connexion est l'occasion de mettre le système à jour.

#### 4.1.1 Modèle général

La composition de l'architecture s'est effectuée avec en arrière pensée les lignes directrices données par énoncées plus haut [Xhafa et Poulouvassilis, 2010]. Utiliser une architecture orientée événements pour faire de la modélisation 3D peut sembler non nécessaire. Cependant lorsqu'on s'intéresse aux apports que cela peut générer pour tous les métiers engagés (utilisateurs, développeurs, analystes métier) on peut se demander pourquoi cela n'a pas été plus mis en avant auparavant. La sensibilisation à l'historique des données et aux interactions inter-utilisateurs est partagée par les utilisateurs et les analystes métier. Quand à la sensibilisation à la distribution des données elles est une composante importante pour les utilisateurs et les développeurs. Concernant les premiers, cela garantie une certaine autonomie dans la création. Pour les seconds, la répartition de la charge permet de profiter du potentiel computationnel de toutes les parties prenantes du réseau.

Dans 3DEvent, le langage partagé se réfère au domaine de la manipulation d'objets 3D mais aussi au domaine de la collaboration. Par exemple le terme de maillage peut se référer à la fois au maillage géométrique ou bien au maillage de l'architecture réseau, d'où l'importance de définir les différents contextes en amont. Notons que le contexte de l'application peut faire varier les frontières d'un domaine. Le modèle issu du domaine défini permet de mettre en valeur les aspects métiers liés à l'application.

Le patron **Event Sourcing (ES)** permet de capturer tous les changements d'état d'une application sous la forme d'une séquence d'évènements. Ces évènements sont conservés dans un journal d'évènements et peuvent être rejoués pour retrouver l'état de l'application. Les évènements représentent des faits immuables qui sont seulement ajoutés au journal les un après les autres, ce qui permet des taux de transaction élevés et une réplication efficace (cf Section 3.4.4). Dans 3DEvent, plusieurs composants d'ES sont étendues selon les applications :

**Acteur** Un acteur consomme des évènements à partir d'un journal d'évènements et produit des évènements pour le même journal d'évènements. L'état interne dérivé à partir des évènements consommés est un modèle d'écriture en mémoire (*in-memory*) et contribue à la partie commande (C) du CQRS.

**Vue** Une vue est un acteur qui ne fait que consommer des évènements à partir du journal d'évènement. L'état interne dérivé à partir des évènements consommés est un modèle de lecture en mémoire et contribue à la partie requête (Q) du CQRS.

**Producteur** Un producteur est un acteur qui produit des évènements à partir du journal d'évènements pour mettre à jour la base de données. L'état interne dérivé à partir des évènements consommés est un modèle de lecture en mémoire et contribue à la partie requête (Q) du CQRS.

**Processeur** Un processeur est un acteur qui consomme des évènements à partir d'un journal d'évènements et produit les évènements traités pour un autre journal d'évènements. Les processeurs peuvent être utilisés pour connecter les journaux d'évènement au traitement des évènements..

Les évènements produits par un des composants présentée ci-dessus peuvent être consommés par d'autres de ces abstractions s'ils partagent un journal d'évènements local ou distribué.

Un journal d'évènements peut fonctionner sur un seul site ou alors être répliqué sur plusieurs sites. Le site est considéré comme une zone disponible qui accepte l'écriture d'un journal d'évènements local même s'il est partitionné sur plusieurs sites. Les journaux d'évènements locaux situés sur plusieurs sites peut être connectés par le biais d'un journal d'évènements dit « répliqué » qui a pour responsabilité de préserver l'ordre causal des évènements.

Les sites peuvent être situés à des endroits géographiquement distincts ou sur des nœuds à l'intérieur d'une même grappe (*cluster*) ou encore être sur le même nœud mais traités séparément selon les zones disponibles nécessaires au fonctionnement de l'application. Les Acteurs et les Processeurs écrivent cependant toujours sur leur journal d'évènements local. Les composants peuvent soit collaborer sur un journal d'évènements local sur le même site, ou bien au travers d'un journal répliqué sur différents sites.

Il est important de différencier le journal d'évènements de la base de données (côté serveur). La base de données peut ne contenir qu'une partie du journal. Une base de données peut également être considérée comme un élément complémentaire au journal d'évènements, cependant et bien que parfois confondus, ils restent bien distincts conceptuellement.

Le journal d'évènements commun est la base des échanges pour communiquer par le biais d'évènements de collaboration. Ce type d'architecture se retrouve dans différents cas d'utilisation :

- *Processus métier distribués.* Les acteurs de différents types utilisent des évènements pour communiquer et parvenir à résoudre un problème commun. Bien qu'ils jouent des rôles différents dans le processus métier, ils réagissent à la réception d'évènements (*reactive programming*) en mettant à jour l'état de l'application et en produisant de nouveaux évènements. Cette forme de collaboration est appelée collaboration dirigée par les évènements.
- *Réplication d'état d'Acteur.* Les acteurs de même type consomment les évènements de chacun pour répliquer l'état interne avec une cohérence causale. Dans 3DEvent, les opérations concurrentes sont autorisées dans pour mettre à jour l'état des acteurs répliqués et permettre la résolution interactive de conflit en cas de mises à jour concurrentes et conflictuelles.
- *Agrégation d'évènement.* Les vues et les producteurs agrègent des évènements à partir d'autres composants pour générer des vues spécifiques à l'application. La collaboration évènementielle apporte de la fiabilité dans la gestion des données dans un système distribué. Par exemple, si un processus distribué échoue à cause d'un problème sur une partie du réseau, le système reprend automatiquement dès les répliques sont à jour.

Les composants souscrivent à leur journal d'évènements en s'accrochant au bus d'évènements. Les évènements nouveaux sont poussés vers les souscripteurs, ce qui leur permet de mettre à jour l'état de l'application avec une latence minimale. Un évènement écrit à un endroit est publié de manière fiable aux souscripteurs sur ce site et aux souscripteurs des sites distants. Par conséquent, les composants qui échangent par le biais d'un journal d'évènements répliqué communiquent via un bus qui préserve l'ordre causal des évènements de manière durable et tolérant au partitionnement. De ce fait, les services sur les partitions du réseau inter-sites (lien entre les sites) peuvent continuer d'écrire des évènements localement. La livraison des évènements sur les sites distants reprend automatique lorsque les partitions sont à jour.

Le journal d'évènements répliqué localement et fournit un ordre total des évènements stockés et appartient à un site. Le site est une zone de disponibilité qui héberge un ou plusieurs journal d'évènements. Les évènements d'un journal d'évènements sont répliqués de manière asynchrone sur les autres des journaux d'évènements des sites distants. Afin de lier des journaux d'évènements (localisés sur différents sites)

à un journal d'évènements répliqué, les journaux d'évènements locaux doivent être accessibles à partir des points d'entrées de réplication. De plus, ces points d'entrée doivent être connectés entre eux afin de créer un réseau de réplifications. Un journal d'évènements répliqué est représenté par un journal d'évènements local sur chacun des sites participants.

Les points d'entrée permettent de gérer un ou plusieurs journaux d'évènements. Ces journaux sont identifiés pour permettre à la réplication de ne s'intéresser qu'aux journaux de même identifiant. Les journaux avec différents identifiants sont ainsi isolés les uns des autres et leur distribution peut donc varier selon les sites.

Les journaux répliqués fournissent l'ordre causal des évènements stockés : l'ordre de stockage est le même sur tous les sites, ce qui veut dire que les consommateurs qui lisent les évènements du journal local vont toujours voir les effets avant leurs causes.

### 4.1.2 Mécanisme de gestion de version

3DEvent intègre une procédure de gestion de version dans l'[event store](#) afin de gérer au mieux la cohérence des données. Chaque gestion de commande (Figure ??) entraîne la génération d'un ou plusieurs évènements. Ces évènements sont considérés comme « soumis » (*uncommitted*) mais pas encore « publiés » (*committed*). Pour qu'ils le deviennent, l'agrégat concerné par ces évènements doit produire une nouvelle version sans être en conflit avec la précédente. En passant la version attendue  $v_a$  au gestionnaire de conflit, on est à même de la comparer avec la version courante  $v_c$ . Il existe deux cas où un conflit est levé :

- a) La version  $v_a$  correspond à la valeur d'initialisation
- b) La version  $v_a$  est différente de la version  $v_c$

Dans [a\)](#), on s'assure qu'après une action la version initiale de l'agrégat ne peut être la même. Cet item peut sembler évident mais il est important de le noter car il dépend entièrement la valeur initiale choisie pour les agrégats du [framework](#) (on peut commencer à n'importe quelle valeur  $-1, 0, \dots$ ).

### 4.1.3 Cohérence Éventuelle en CQRS

La [cohérence éventuelle \(CE\)](#), ou *eventual consistency* en anglais, propose dans un système distribué contenant plusieurs répliques d'avoir une coordination lâche entre ces répliques. Cela apporte de nombreux avantages en termes de disponibilité,

tolérance aux fautes et sécurité des données et évite l'intégration de protocoles 2 phase commit ou de protocoles Paxos (consensus) complexifiant les échanges. La [CE](#) introduit l'idée que toutes les répliques se réconcilient au bout d'un moment (*forward progression*) pour avoir le même état final. Si le caractère vicié d'une information est détecté, le système doit le « réparer » pour obtenir le bon état.

L'ordre de livraison des événements durant les mises à jour reste identique lorsque les événements sont rejoués par la suite car l'ordre de livraison des événements issus de l'[ES](#) est déterminée par l'ordonnancement des événements stockés localement. Au sein d'une réplique, tous les composants [CQRS](#)

#### 4.1.4 Potentielles applications et autres utilisations

La conception et l'implémentation d'une plateforme comme 3DEvent qui est asynchrone, distribuée et orientée événements (notamment la persistance) peut être appliquée à différents champs.

**GIT-like app** Les solutions pour faire de la gestion de version, comme Mesh-Git [[Denning et Pellacini, 2013](#)] par exemple qui fait du *diff and merge* de maillages polygonaux pour des données 3D, sont rarement implémentées (a fortiori en temps-réel) sur des plateformes web à cause du coût et de la complexité que cela peut apporter dans des architectures traditionnelles. 3DEvent peut reconstruire n'importe quel état antérieur grâce à son architecture orientée événements et indiquer les différences entre deux états.

**Scenarii et *path recording*** Pour des jeux sérieux, les graphistes 3D ou des études d'ergonomie, cette fonctionnalité est particulièrement pertinente. Le [framework](#) peut proposer une comparaison entre deux traces laissées par un ou plusieurs utilisateurs. Dans le cas où les utilisateurs ont la même tâche à réaliser, il est facile de faire la différence entre deux réalisations pour comparer, analyser et montrer les résultats pour des raisons pédagogiques ou pour relever des habitudes (de travail) par exemple. Dans l'exemple du jeu sérieux, on peut comparer la trace utilisateur à la trace experte et permettre de rejouer le même scénario plusieurs fois facilement pour observer l'évolution. Ce type de fonctionnalité est intrinsèque à 3DEvent.

**Traçage utilisateur et *crowdsourcing*** 3DEvent peut se révéler être un bon outil pour enregistrer la trace d'un utilisateur lorsqu'il navigue dans la scène. Si on choisit d'enregistrer le chemin de la caméra et les actions utilisateur comme des événements que l'on considère comme des informations "issues de la foule"



(*crowdsourcing*). En utilisant un processus d'apprentissage, il est possible de proposer de meilleurs chemins, repérer des points d'intérêt, ou même proposer des résumés de scène générés à partir des traces des collaborateurs (que s'est-il passé depuis la dernière connexion du collaborateur X ?).

**Audit et monitoring de données 3D** L'ES fournit un mécanisme d'audit intégré qui assure la cohérence des données transactionnelles. Utiliser ce mécanisme pour faire un audit ou surveiller en temps réel l'activité de l'application peut fournir une meilleure compréhension du travail d'équipe ainsi que l'évolution de la conception. Cela peut permettre de repérer (avec du **Complex Event Processing (CEP)**) et corriger certaines fonctionnalités afin d'améliorer l'ergonomie de l'application. Par exemple, si un évènement est anormalement représenté dans le journal des évènements, on va pouvoir lever une alerte facilement.

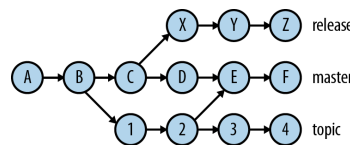


FIGURE 4.1 – Exemple d'arbre de commits Git

#### 4.1.5 Bilan

## 4.2 Architecture de communication hybride

Dans la section précédente, l'introduction du modèle orienté évènement s'intéresse principalement à ce qui se passe au sein d'un seul client. Or, la collaboration passe par la mise en relation des différents collaborateurs et l'échange des données nécessaires à la collaboration : données de connexion, mises à jour de la scène, sensibilisation ...

Afin de pouvoir proposer un **Système d'Édition Collaborative (SEC)** adapté aux besoins de l'édition de scènes 3D, plusieurs critères doivent être respectés :

- granularité fine pour l'édition massive ;
- spécifique à la modélisation 3D ;
- reposant sur des technologies web (réseau, interface, interaction 3D).

Les SEC ont connu un fort développement avec l'intérêt croissant pour le P2P dans les années 2000. La base théorique des SEC s'appuie sur les propriétés de convergence, préservation de la causalité et préservation de l'intention du modèle

CCI [Sun *et al.*, 1998] (cf Section ??). La plupart des travaux liés aux SEC P2P s'intéressent à l'édition collaborative massive de documents textuels dont les propriétés de commutativité sont plus faciles à gérer (insertion/suppression) en comparaison à celles concernant la 3D (multiplication de matrices de rotation). La génération de conflit en 3D peut vite devenir écrasante. Il est donc nécessaire de mettre en place des mécanismes de détection de conflit et de maintien de cohérence au cours des sessions de collaboration. Cela passe par la mise en place d'une architecture de communication hybride pour la collaboration. Le terme « hybride » invoque un compromis entre la centralisation de l'information nécessaire à la prise de décision globale et la décentralisation des échanges utile à l'amélioration du partage de contenu 3D à l'échelle locale. En agissant sur ces deux échelles la granularité de la collaboration est plus fine. Par exemple, le passage à l'échelle est facilité par la présence de ressources locales et la coordination des utilisateurs se fait à une échelle globale ce qui permet également l'accès à une source de vérité centralisée (base de données) et commune.

Cette section décrit le modèle d'architecture mis en place pour gérer la transmission de contenu entre les différents clients participant à l'édition collaborative d'un espace de travail 3D. Ces travaux s'inscrivent dans un contexte où les besoins d'interopérabilité et de standardisation sont élevés pour permettre à des utilisateurs de prendre le système rapidement en main sans installer autre chose qu'un navigateur.

## Constat

WebRTC est une technologie qui fournit aux navigateurs *desktop* et mobiles la possibilité de communiquer en temps-réel (*Real-Time Communications*) via une collection de standards, protocoles et APIs JavaScript. Le standard WebRTC est développé au sein du W3C et de l'Internet Engineering Task Force (IETF) depuis 2011 dans sa version 1.0 (Working Draft). L'un des atouts de cette technologie est de permettre de façon simple et sans module d'extension la capture d'un flux audio et / ou vidéo (ex : applications de VoIP), ainsi que l'échange de données arbitraires entre navigateurs sans nécessiter d'intermédiaires (ex : partage de fichier en P2P). Techniquement, WebRTC supporte un canal temps-réel bidirectionnel pour l'échange de données. Contrairement à WebSocket, qui est basé sur Transmission Control Protocol (TCP), WebRTC se base sur UDP en intégrant une pile de plusieurs protocoles (Figure 4.2) qui lui offre des fonctionnalités similaires (fiabilité, ordonnancement, sécurité).

La jeunesse du protocole (2011) fait que peu de travaux académiques l'utilisent pour créer des **EVC 3D** [Desprat *et al.*, 2015, Steiakaki *et al.*, 2016]. Côté commercial, un grand nombre d'applications et de services basés sur ce protocole ont fait leur apparition (par ordre d'importance) : des systèmes d'échanges audio/vidéo (VoIP)<sup>1</sup>, des systèmes de partage de fichiers<sup>2</sup> et autres applications (capture d'écran, réalité augmentée, jeux)<sup>3</sup>.

La simplicité de la mise en place (très semblable à WebSocket) et la richesse apportée par le **P2P** n'y sont pas étrangers. Les réseaux **P2P** ne sont souvent pas bien connus des développeurs web qui sont habitués aux architectures client-serveur, ce qui peut représenter une barrière d'entrée pour de nouvelles applications réseau. Dans les systèmes **P2P**, il n'y a pas de fermes de serveurs comme il peut en exister dans les applications client-serveur. Les machines clientes et les systèmes d'extrémité (*end system*) sont considérée comme « les ressources » dans un réseau **P2P**. En principe, ces ressources sont difficilement administrables à l'échelle dans un réseau non structuré ; la qualité de service peut en pâtir. Cependant, lors d'un déploiement **P2P** réel, des serveurs sont en général utilisés pour télécharger l'application cliente qui contient la couche intergicielle **P2P** et fournit à l'utilisateur le service de connexion nécessaire à l'accès au service. Ces serveurs sont moins coûteux que peut l'être une ferme de serveurs. De plus, pour beaucoup de services décentralisés, il n'existe pas de solution pérenne pour tester ces applications à l'échelle ; chaque service doit créer son propre système de test.

Ce contexte technologique est un motivation supplémentaire dans les travaux de cette thèse.

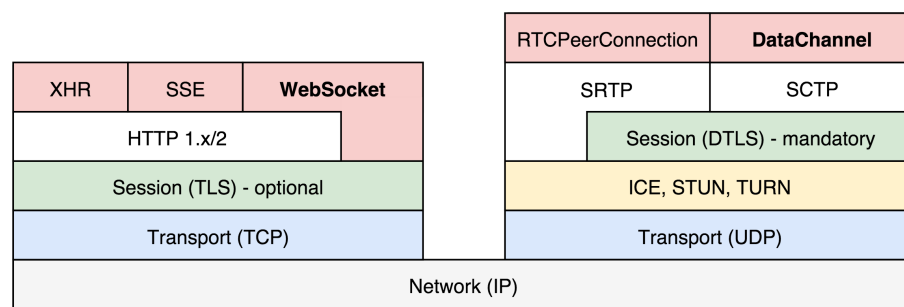


FIGURE 4.2 – Pile des protocoles IP : TCP vs UDP

1. WebRTCWorld en liste un peu plus de 140 <http://www.webrtcworld.com/webrtc-list.aspx>. Consulté le 07/07/2017.

2. WebTorrent <https://github.com/feross/webtorrent>. Consulté le 04/09/2017.

3. Curation de ressources et modules WebRTC recensant plus de 100 projets <https://github.com/openrtc-io/awesome-webrtc>. Consulté le 07/07/2017.

## Contribution

Une architecture de communication hybride en trois parties serveur, persistance, pairs est utilisée dans 3DEvent [Desprat *et al.*, 2016]. Cela permet de concilier à la fois les avantages d’une architecture client-serveur et ceux du P2P en évitant certains désavantages occasionnés dans ceux-ci (engorgement du serveur, pair seul sur le réseau...). Dans le contexte des EVC 3D, le but est d’obtenir une architecture de communication :

- entièrement basée web,
- robuste à l’évolution du nombre de collaborateurs,
- efficace en terme de d’accès et distribution de la donnée,
- et qui s’adapte à l’échelle selon les besoins de la collaboration.

Dans cette section, les différents composants de l’architecture sont détaillés. Ensuite sont expliqués les mécanismes de mise en relation de ces composants pour que les différents participants d’une session collaborative puissent se communiquer de manière transparente, cohérente et résistante aux pannes.

### 4.2.1 Présentation générale

Un intergiciel (*middleware*) se compose en général d’une API de recherche 4.3. Dans notre modèle cette brique est principalement en lien avec le gestionnaire d’instance qui se charge de la recherche. L’API de messagerie concerne plus directement le système d’envoi et de réception de message. Les différents message vont concerner la partie routage de l’information, le maintien à jour du répertoire de voisin et leur dynamique, ainsi que la description des connexions à maintenir. Le bloc de gestion de session permet au pair de savoir avec qui il est connecté et contient également les méta informations liées à ces liens (temps de connexion). Chaque pair doit également posséder un endroit où stocker les information de contenu à traiter qui correspond à stockage de contenu. Cette dernière peut prendre plusieurs formes : in-memory, stockage local, disque dur... selon le type de stockage adapté et disponible. Un pair est également au courant de son rôle. Le rôle d’un pair permet de distinguer s’il est un super pair, un pair normal, un pair actif, ou un pair passif... Le rôle induit les capacités et la configuration de chaque pair, i.e. un pair passif est configuré uniquement pour relayer les données tandis qu’un pair actif sera configuré pour traiter et relayer les données tandis qu’un pair passif ne fait que stocker et relayer les données.

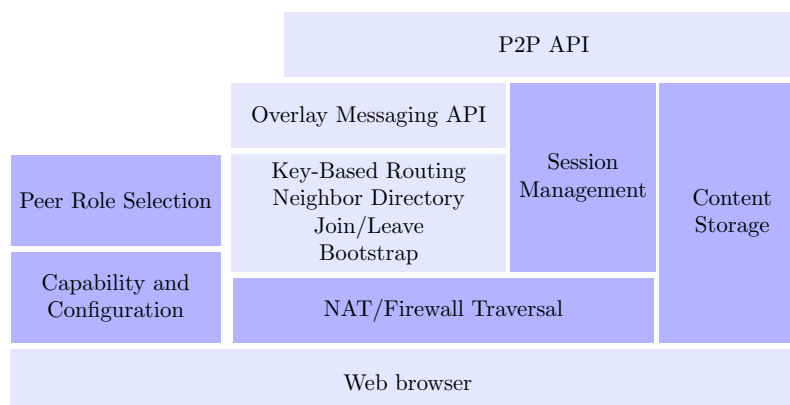


FIGURE 4.3 – Composants de chaque pair dans 3DEvent (point de vue réseau)

Le serveur assure d'une part la centralisation du stockage à long-terme et d'autre part la mise en relation des différents clients.

La couche **P2P** fournit une dissémination rapide de l'information et décentralise la réplication des données à court terme. Cela évite donc au serveur d'être le point central des échanges en déchargeant les canaux passant par le serveur.

**Connexion des pairs en début de session** La Figure 4.4 représente la séquence d'actions nécessaire à une instance 3DEvent (*idA*) pour rejoindre le réseau contenant déjà d'autres instances 3DEvent. L'action *join* est exécutée lorsqu'un utilisateur envoie ses informations de connexion sur portail de connexion (à partir d'une instance web) ou lorsqu'une instance serveur est lancée. Cette action ajoute le nouveau pair à la liste des pairs présents sur le réseau, gérée par le gestionnaire d'instance, et retourne la liste des pairs avec lesquels le pair doit se connecter. Pour chaque pair *idB* de la liste retournée *ids*, *idA* utilise le mécanisme de signalisation (offre/demande). Le mécanisme est déclenché par l'instanciation d'un *network bridge* dans l'*event store* de *idA* puis celui de *idB*. Afin de resynchroniser les deux pairs (après cette série d'échanges asynchrones), *idA* et *idB* s'échangent des métadonnées sur la situation respective de leurs *ESM* afin de se synchroniser.

### 4.2.2 Event Store

L'Event Store est un composant clé dans le traitement des événements. Il prend en entrée des événements générés ou reçus extérieurement et produit en sortie des événements cohérents qui peuvent être par la suite publiés. Les événements sont considérés comme cohérents lorsqu'il n'y a pas d'erreur de cohérence, i.e. lorsque les numéros de versions sont bien ordonnés. Chaque Event Store contient deux

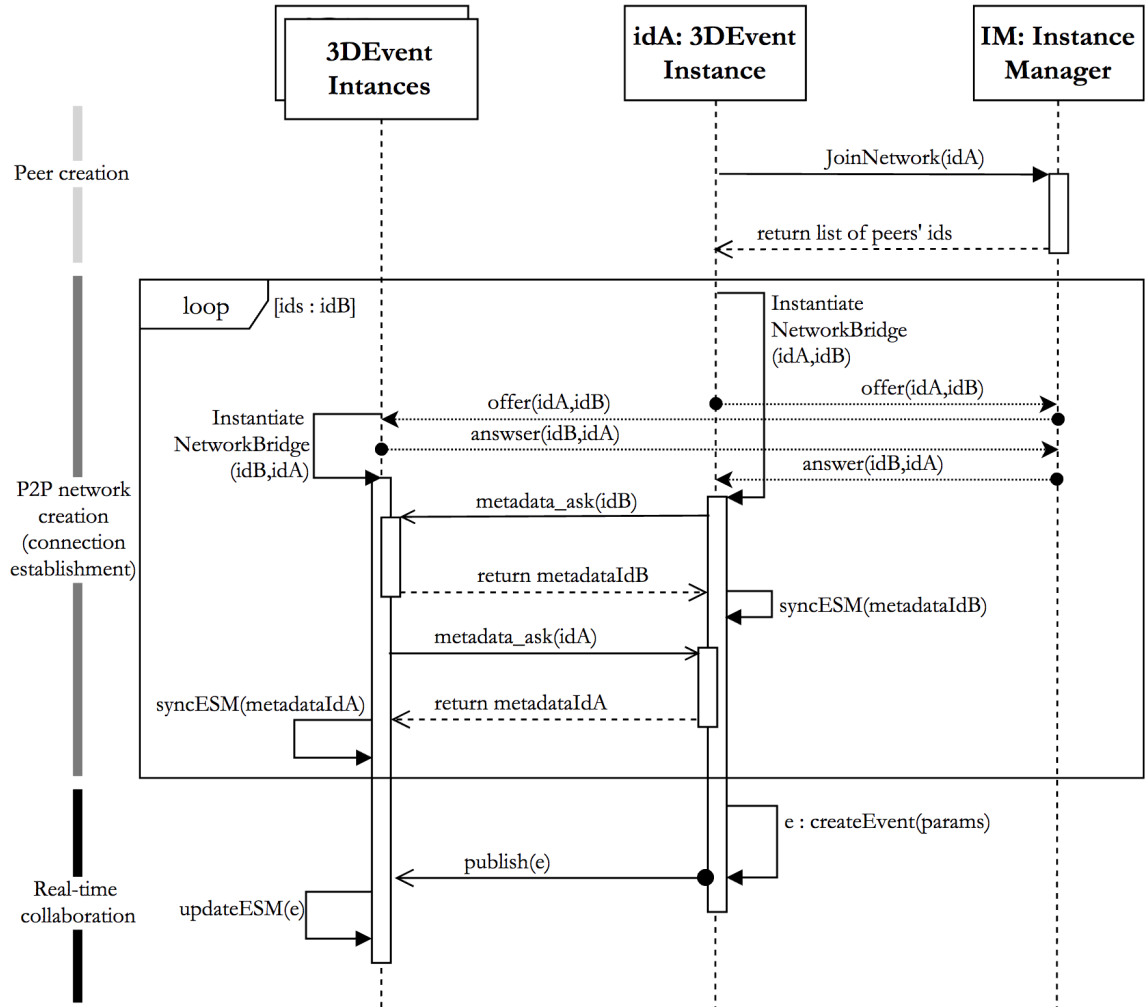


FIGURE 4.4 – Protocole de connexion au réseau d'instance 3DEvent

éléments : l'Event Stream Manager (ESM) et des Network Bridges (NB). Un ESM est une structure de données représentée par une collection de flux d'évènements. Un flux d'évènement est représenté par un tableau d'évènements indexés en séquence permettant de stocker les évènements d'un agrégat dans l'ordre temporel. Si un flux ne rencontre pas de problème de cohérence alors le dernier index correspond au numéro de version de l'agrégat. Lorsque l'Event Store reçoit un évènement de l'instance courante, l'ESM récupère (ou crée) le flux d'évènements associé à l'agrégat référencé par l'évènement. Alors, la cohérence de la version est vérifiée en comparant la version attendue (exposée dans les métadonnées de l'évènement) et la version actuelle de l'agrégat. Si les deux numéros de versions sont égaux, l'évènement est ajouté à la fin tableau du flux pour être stocké, sinon une exception est levée. La gestion des exceptions est expliquée dans . Une fois le stockage effectué dans l'ESM, l'évènement est publié.

### 4.2.3 Persistance à long terme

Dans un contexte de collaboration sur le long terme pour des entreprises où le besoin d'information accessible sur le long terme est nécessaire. La persistance long-terme stocke le journal d'évènement qui est la source de vérité de l'application. Elle peut également stocker des projections prédéfinies, calculées à la volée ou encore des *snapshots* de l'application.

### 4.2.4 Synchronisation client-serveur

Lors de la connexion d'un nouveau client a lieu la synchronisation des deux systèmes de persistance pour obtenir les mises à jour :

1. depuis le client, où l'on distingue trois cas :
  - (a) travail "*offline*" (hors ligne) : l'utilisateur a travaillé hors ligne et doit maintenant publier "en ligne" son travail. Les mises à jour publiées sur la base de données ; le serveur vérifie si aucun conflit ne survient puis fusionne (*merge*) les nouvelles entrées avec l'existant ;
  - (b) travail "*serverless*" (en collaboration avec d'autres pairs sans le serveur) : dans le cas où le serveur est absent, les clients peuvent continuer de créer en collaborant. Ces données n'étant stockées que sur le client, il est de les transmettre à la base de données dès qu'une connexion est possible. Cela peut être fait en une fois ou de manière partagée ;
  - (c) travail "*online*" (en collaboration avec d'autres pairs avec le serveur) : le client envoie régulièrement ses nouvelles modifications pour qu'elles soient intégrées à la base de données.
2. depuis la base de données : Le client reçoit toutes les nouvelles mises à jour de la scène depuis la dernière fois qu'il s'est connecté. Cela peut également inclure des mises à jour qui sont en conflit avec ce qu'il y a dans son propre espace de stockage qu'il lui faut donc modifier. Dans le cas où un utilisateur est seul connecté, la base de données est la seule source disponible pour la mise à jour du client.

### 4.2.5 Gestion de la cohérence

Respect de la causalité

Convergence des répliques

Préservation de l'intention

### 4.2.6 Bilan

## 4.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons vu les différents composants de l'architecture de communication pour réalisation d'un [EVC 3D](#). En mettant en avant la technologie WebRTC, nous avons montré qu'il était possible de réaliser une architecture qui respecte les standards du web et l'interopérabilité nécessaire à ce type d'environnement. La mise en place d'une architecture décentralisée dans un environnement distribué permet de mettre à contribution tous les acteurs de la collaboration. De ce fait, l'accessibilité des ressources est renforcée par la présence de nombreuses unités présentes sur le réseaux. Cela permet à la fois une récupération du contenu rapidement et octroie une autonomie certaine aux contributeurs.



# Chapitre 5

## Implantation

### Contents

---

<b>5.1</b>	<b>3DEvent : Plateforme web de manipulation et visualisation collaborative d'objets 3D . . . . .</b>	<b>47</b>
5.1.1	Éditeur 3DEvent . . . . .	47
5.1.2	Interface utilisateur . . . . .	48
5.1.3	Flexibilité de la visualisation . . . . .	49
<b>5.2</b>	<b>Intergiciel P2P pour l'échange de données 3D . . . . .</b>	<b>50</b>
5.2.1	Données d'échange . . . . .	51
5.2.2	Synchronisation des données . . . . .	51
<b>5.3</b>	<b>Résumé des choix techniques . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>5.4</b>	<b>Bilan . . . . .</b>	<b>53</b>

---

## 5.1 3DEvent : Plateforme web de manipulation et visualisation collaborative d'objets 3D

Cette section présente l'implantation de 3DEvent, la plateforme web de manipulation et visualisation collaborative d'objets 3D réalisée à partir du modèle présenté dans le chapitre précédent. La première partie s'intéresse à l'intégration du framework pour proposer une application d'assemblage d'objets 3D. La seconde partie expose les choix techniques pour l'interface utilisateur et la mise en avant du système de visualisation flexible.

### 5.1.1 Éditeur 3DEvent

3DEvent est à la fois un [framework](#) et un éditeur 3D pour la visualisation et la manipulation d'objets 3D. La partie [framework](#) est basée événement pour répondre à des contraintes liés à la temporalité de l'information traitée via l'éditeur ainsi qu'à la distribution de l'information en terme d'intégrité et de poids. L'éditeur va réagir et interpréter les informations (événements) fournies par le [framework](#) pour proposer visualisation et interactions adaptées.

L'application 3DEvent est un éditeur 3D reposant sur les principes et les technologies du web qui permet de manipuler des objets 3D de manière collaborative en temps-réel. Les interactions possibles sont :

**Visualiser, naviguer, utiliser les outils de transformation** L'utilisateur peut comme dans un environnement 3D classique interagir avec la vue en utilisant la souris (survol, clic) et en bougeant la caméra (déplacements). Il peut utiliser les commandes clavier et souris pour effectuer des opérations de translation, rotation et homothétie directement dans le *viewport* ou via le menu ou via la console du navigateur.

**Charger des modèles 3D** L'éditeur gère la plupart des formats de fichier 3D (OBJ, PLY, DAE, glTF...)

**Changement de référentiel** La modification des coordonnées de références (local/global) pour les différentes transformations possibles

**Grid snapping** Cette fonctionnalité permet d'aligner les modèles avec la grille avec un effet de magnétisme sur les intersection de la grille.

**Changement de point de vue** L'utilisateur peut à tout moment passer de son point de vue à celui d'un autre utilisateur. Le choix d'implanter ce type de

fonctionnalité s'inscrit dans la perspective de sensibilisation de l'utilisateur au travail de ses collaborateurs. Ainsi, lors de la session, le fait de prendre de point de vue d'un collaborateur, se mettre à sa place, est une manière de comprendre son point de vue, son fonctionnement et d'imaginer ses perspectives de conception à travers le point de vue qu'il a choisit.

### 5.1.2 Interface utilisateur

Dans le but de proposer une [Interface Utilisateur \(IU\)](#) proche des fonctionnalités métier liées à la modélisation 3D avec une interface orientée tâche. De cette manière, le modèle orienté événements présenté dans le précédent chapitre est directement orientée métier.

#### Présentation de l'interface

Lorsqu'un utilisateur se connecte à une scène, il a accès à une interface web (dans un navigateur) qui représente l'espace de travail collaboratif lui permettant d'utiliser différentes fonctionnalités. Les deux modalités d'interaction sont le clavier et la souris. Le premier niveau de cette interface est scindée en deux panneaux :

1. L'espace 3D consacré à la visualisation des objets et à leur manipulation dans l'environnement 3D ;
2. La barre d'outils qui contient trois onglets :
  - (a) "Scene" contient tous les détails de la scène et des maillages qu'elle inclue ;
  - (b) "Collaboration" fournit les informations liées à la collaboration ;
  - (c) "History" liste tous les événements qui ont eut lieu dans la scène et leurs détails.

L'onglet "Scène" possède un bloc contenant les détails d'un maillage en cours de sélection. Cela permet d'avoir la description des propriétés de l'objet sélectionné et une manipulation de ses paramètres (position, rotation et mise à l'échelle) plus précise que via l'espace 3D avec le cliqué/déplacé .

L'onglet "Collaboration" présente la liste des collaborateurs qui participent à la scène. Chacun d'eux est décrit par son nom, son état (connecté ou déconnecté) et son rôle (administrateur, éditeur, lecteur ou autre<sup>1</sup>). En cliquant sur un élément de la liste, l'utilisateur accède au dernier point de vue dans l'espace 3D connu du collaborateur représenté.

---

1. Un rôle peut être défini par le biais du [framework 3DEvent](#)

L'onglet "History" liste tous les événements passés dans la scène en fournissant l'accès à leur détail. Pour chaque événement, le système est capable de montrer dans l'espace 3D la différence entre l'état après l'événement cliqué  $state_x$  et l'état courant  $state_n$ . L'utilisateur peut à partir de cette visualisation choisir de « revenir en arrière » sans perdre les données entre  $state_n$  et  $state_x$  car dans notre système cela s'effectue par compensation (cf Event-Sourcing Section X).

Dans chaque onglet on trouve donc différents blocs [HTML](#), avec des comportements spécifiques à un agrégat et injectés dynamiquement. Ces blocs correspondent aux Views de notre modèle.

### 5.1.3 Flexibilité de la visualisation

Dans l'approche [CQRS](#), une projection est une dérivation de l'état courant à partir du flux d'événements. Pour Abdullin, «la projection est le processus de conversion (ou d'agrégation) d'un flux d'événement en une représentation structurée. Cette dernière (qui est mise à au moment où le flux est parcourue) peut être avoir différentes appellations : modèle de lecture persistant, vue ou état.» La partie lecture du modèle (l'affichage sur interface utilisateur) bénéficie des projections en lui permettant de réduire l'afflux des événements, ne laissant filtrer que ceux qui sont pertinents pour la vue. La projection fournit une vue adaptée (filtrée, enrichie...) du flux d'événements au client. Elle peut également être utilisée pour mettre en avant des aspects experts (notifications, déclenchement d'action) ou des raisons de confidentialité. Une projection peut être créée de manière synchrone (à la volée) au fur et à mesure de la publication des événements ou de manière asynchrone et donc découplée du flux des événements.

Du fait de la nature d'un réseau [P2P](#), les pairs ne reçoivent pas forcément les paquets réseau de manière ordonnée. Par conséquent, les messages pouvant arriver dans n'importe quel ordre, qu'arriverait-il si un événement A ( $eA$ ) nécessitant un autre événement B ( $eB$ ) pour être appliqué arrivait avant ? Dans cette situation, le système va générer une erreur en essayant d'appliquer  $eA$  sur un état inadéquat car il n'a pas d'information sur la hiérarchie d'application des événements ( $eB$  puis  $eA$ ).

Pour pallier ce problème, l'introduction du système de projection permet d'avoir un mécanisme (comme un automate fini) qui définit les transitions nécessaires pour passer d'un état à l'autre et qui réalisent les actions déterminées en fonction des événements qui arrivent. Par exemple, si on essaie d'ajouter un objet dans une scène

( $eA$ ) sans avoir créé la scène ( $eB$ ) la projection met en attente  $eA$  jusqu'à recevoir  $eB$ . Dans le cas où  $eB$  n'arrive jamais, la projection ne pourra jamais utiliser  $eA$ .

## 5.2 Intergiciel P2P pour l'échange de données 3D

L'architecture de communication décrite dans le chapitre précédent nécessite l'implantation d'un intergiciel P2P compatibles avec les besoins liés à la 3D, le web et la collaboration.

L'assomption est faite que tous les clients utilisent des navigateurs qui implémentent et supportent le protocole WebSocket et l'API RTCDataChannel.

La topologie de l'architecture de communication repose sur la mise en relation automatique des clients par le biais du serveur pour établir une connexion WebRTC. Pour ce faire, chaque client envoie son identifiant (ID) lors de sa première requête au serveur qui le stocke. Selon le paramétrage de la connectivité directe minimum établie préalablement, le serveur recherche aléatoirement l'ID d'autres clients qui satisfont la règle de connectivité. Cette règle de connectivité minimum permet d'ajuster la densité du maillage (connectivité élevée : maillage partiel dense voire complet ; connectivité faible : maillage partiel éparse) et d'obtenir une topologie maillée adaptée aux besoins de l'application en termes de synchronisation (temps-réel ou pas) ou aux capacités des appareils. Il faut noter cependant que plus la connectivité est faible, plus l'information a besoin de « rebondir » pour atteindre tous les pairs et par conséquent le temps de transmission est augmenté (exemple d'une distribution en ligne).

### De navigateur à serveur

La connexion entre un pair (client) et le serveur est établie sur la base du protocole WebSocket. Cette connexion bi-directionnelle est initialisée lors de la première requête du client pour récupérer le contenu de l'application. Cette connexion sert à la fois pour la phase de *signaling* lors de l'établissement d'une connexion WebRTC mais également pour que le client puisse envoyer des mises à jours originales à la base de données via le serveur.

### De navigateur à navigateur

Lors de la connexion d'un nouveau client à la scène, le serveur effectue la phase de signaling permettant de le mettre en relation avec un autre client. Le mécanisme est répété tant que la règle de connectivité peut s'appliquer. Le client reçoit une

notification de l'établissement de la connexion avec un autre client ce qui lui permet de démarrer l'échange de données.

L'API `RTCDataChannel` permet à chaque pair d'échanger des données arbitraires avec d'autres à partir du navigateur avec des propriétés de livraison personnalisables (fiable ou non fiable, ordonné ou non ordonné) selon le transport sous-jacent. Dans `3DEvent`, le choix d'avoir un transport fiable et non ordonné a été fait pour respectivement garantir l'arrivée d'une donnée émise par l'utilisateur au sein de l'application et permettre des échanges asynchrones. En cas d'arrêt soudain du serveur, si une connexion a été établie préalablement entre les clients et est toujours en cours, elle n'est pas impactée par la défaillance du serveur.

### 5.2.1 Données d'échange

En sachant que le modèle est conçu pour des applications web, `3DEvent` a besoin d'un format de données permettant de faire communiquer des acteurs hétérogènes du système. Le format [JavaScript Object Notation \(JSON\)](#), dérivé de la notation des objets du langage JavaScript, il est lisible et interopérable. Le format de fichier [GL Transmission Format \(glTF\)](#) se base sur la représentation [JSON](#) afin de décrire une scène 3D. Ce type de données est assez abstrait et suffisamment générique pour représenter n'importe quelle donnée. Par exemple le format de fichier [glTF](#) se base sur la représentation [JSON](#) afin de décrire une scène 3D. Le format [JSON](#) est aussi utilisé pour la sérialisation et la désérialisation des objets transmis par `RTCDataChannel` qui prend n'importe quel format de données.

L'API `RTCDataChannel` supporte beaucoup de types de données différents (chaînes de caractères, types binaires : `Blob`, `ArrayBuffer`...). Dans un environnement multi-utilisateur avec des données hétérogènes (3D, images, informations) tel que `3DEvent` cela facilite l'interopérabilité.

### 5.2.2 Synchronisation des données

#### Persistance à court terme

Le navigateur (client) offre un espace de stockage avec l'interface `Storage` de l'API Web Storage qui donne accès au `session storage` ou au `local storage`. Grâce à un système clé/valeur, il est possible d'avoir une persistance des données à travers les sessions du navigateur. Le contenu stocké correspond aux données générées par un utilisateur et par ses collaborateurs. Les répliques stockées sur chaque navigateur

Tableau 5.1 – Type de messages lors de la synchronisation

Message	Description
STREAM_SYNC_ASK	Demande de synchronisation d'un <i>stream</i>
CHUNK	Réception d'une donnée <i>chunk</i> )
READY_ASK	Prêt pour la démarrer la demande de données de sync.
READY	Prêt pour démarrer la réception de données de sync.
ALL_EVENTS_SYNC_ASK	Demande de toutes les données typées événement
EVENTS_SYNC	Réception de données (en cours de synchronisation)
META_DATA_ASK	Demande de métadonnées
META_DATA	Réception de métadonnées
SYNC	Réception de données (en cours de synchronisation)
EVENT	Réception d'une donnée typée événement
END_SYNC	Fin de la synchronisation

permettent à un utilisateur une plus grande autonomie en cas de déconnexion. C'est également un moyen de distribuer les mises à jour générées par les clients entre les clients grâce au protocole de [streaming 3D](#) (cf. 5.2.2) sans passer par le serveur.

Ce stockage fonctionne sur un système de clé/valeur qui rend facile l'accès aux événements enregistrés sur le client. La configuration du client est également stockée localement.

### Protocole de streaming pour la synchronisation

Il existe plusieurs méthodes de transmission de contenu au sein d'un réseau P2P que l'on peut catégoriser selon deux modes : le téléchargement (*download*) et le flux continu (*streaming*). Le téléchargement requière que le contenu soit entièrement téléchargé pour pouvoir être lu. Tandis que le flux continu peut être lu au fur et à mesure de sa récupération. Ce mode est principalement utilisé pour la lecture de vidéo en ligne. En comparaison le mode téléchargement est moins restrictif et relativement simple à mettre en place. Tout comme les systèmes utilisant une architecture client-serveur, la transmission de contenu en P2P peut également être catégorisée selon ces deux modes. Une catégorisation plus précise du flux continu peut être donnée selon quand le contenu est généré : en direct (live) et à la demande (*on-demand*).

Le mécanisme de routage que nous avons utilisé dans [Desprat *et al.*, 2015] est proche du routage de GNutella.

## 5.3 Résumé des choix techniques

Tableau 5.2 – Statut du nœud

Message	Description
ERROR	En erreur (désynchronisation)
READY	Prêt à recevoir des messages
META_DATA_ASK	En demande de métadonnées
META_DATA_RECEIVE	En réception de métadonnées
CLOSE	Déconnecté (connexion fermée)
RECEIVE_SYNC	En réception de données à synchroniser
CONNECTED	Connecté (connexion ouverte)
INIT	Initialisation
OK	Connecté et synchronisé
SEND_SYNC	En demande de synchronisation
END_SYNC	Synchronisation terminée

**Base de données NoSQL** L'évolution de l'utilisation du web en tant que plateforme applicative a encouragé le changement dans le stockage des données pour de nouveaux besoin supportant de larges volumes de données (comme les données 3D). Une base de données [Not Only SQL \(NoSQL\)](#) fournit un schéma libre et dynamique ainsi qu'une API de requête riche pour la manipulation de données. De plus, la possibilité d'enrichir un document à la volée facilite l'évolution des objets (3D) et la maintenance. de l'application. 3DEvent intègre un système de persistance sur le long terme caractérisé par une base de données [NoSQL](#).

La base de données ([NoSQL](#)) conserve tous les événements qui sont produits dans une scène. La mise en place d'une base de données centralisée apporte de la robustesse au système en lui fournissant un référent sans toutefois le surcharger ainsi qu'une expérience utilisateur transparente limitant les interruptions de service.

## 5.4 Bilan



# Chapitre 6

## Expérimentations

### Contents

---

<b>6.1</b>	<b>Cas d'étude : Assemblage collaboratif d'objets 3D dans un environnement web</b>	<b>55</b>
<b>6.2</b>	<b>Expérimentation 1 : preuve de faisabilité</b>	<b>55</b>
6.2.1	Présentation de l'expérimentation	55
6.2.2	Résultats	55
6.2.3	Discussion et Conclusion	55
<b>6.3</b>	<b>Expérimentation 2 : Intégration du framework évènementiel</b>	<b>55</b>
6.3.1	Résultats et Discussion	57
<b>6.4</b>	<b>Comparaison entre l'expérimentation 1 et l'expérimentation 2</b>	<b>60</b>
6.4.1	Résultats	60
6.4.2	Discussion et Conclusion	60

---

## 6.1 Cas d'étude : Assemblage collaboratif d'objets 3D dans un environnement web

Dans [Desprat *et al.*, 2015] et [Desprat *et al.*, 2017],

## 6.2 Expérimentation 1 : preuve de faisabilité

Cette expérimentation est tirée de l'article [Desprat *et al.*, 2015]. Un des objectifs de cette expérimentation est de démontrer la faisabilité de notre approche réseau hybride avec une attention particulière à l'égard de l'expérience utilisateur.

### 6.2.1 Présentation de l'expérimentation

### 6.2.2 Résultats

### 6.2.3 Discussion et Conclusion

## 6.3 Expérimentation 2 : Intégration du framework évènementiel

L'expérimentation propose de répliquer une collaboration réaliste entre différents participants travaillant à distance. Ce cas d'étude présenté dans [Desprat *et al.*, 2017] souligne plusieurs aspects relatif à la fiabilité du modèle et de son implantation de deux manières :

- fonctionnelle : manipulation et visualisation 3D, historique ;
- et technique : récupération de l'information, cohérence des données, disponibilité du réseau.

Quant à l'observation du comportement des participants, elle est effectuée de manière quantitative (*monitoring*) et de manière qualitative (questionnaire) lors de l'exécution d'une tâche coopérative au sein de l'application.

**Tâche à effectuer** Les participants devaient assembler les différentes parties d'un modèle 3D en utilisant l'application 3DEvent et les fonctionnalités décrites précédemment pour que le résultat corresponde à l'assemblage donné en exemple (images). La complexité de la tâche a été modulée selon plusieurs facteurs : le nombre de parties composant le modèle et le nombre de collaborateurs. Afin de permettre la

manipulation des objets 3D facile à apprendre et utiliser, il a été choisi de conserver des manipulations de haut niveau.

**Population** L'expérience a été conduite sur 12 groupes de deux ou trois participants chacun. Chaque participant était localisé en France dans une zone urbaine avec de bonnes infrastructures en travaillant sur des réseaux distincts avec une bonne connexion internet (au moins 20Mb/s) pour éviter d'avoir des latences extrêmes (>10 secondes) au cours des expérimentations. Les participants étaient des étudiants de Master ou de Doctorat en informatique (pas nécessairement familiers avec les environnements 3D). Les participants étaient autorisés à communiquer entre eux par chat.

**Procédure** Les modèles utilisés lors de l'expériences sont décrits dans le Tableau 6.1. L'expérimentation se déroule en trois phases :

**Phase d'essai** Chaque participant s'entraîne pendant 5-10 minutes sur un modèle de test dans l'application pour se familiariser avec l'interface et les fonctionnalités proposées.

**Phase solo** Le participant effectue un assemblage du modèle Rotor ou Camera Box.

**Phase de collaboration** Un groupe de participants réalise deux assemblages sur (i) un petit modèle (10 ou 12 parties) puis (ii) un plus gros modèle (16 parties). La phase de collaboration a été répétée six fois : trois fois avec un groupe de deux participants et trois fois avec un groupe de trois participants.

Du fait que les participants pouvaient participer à différentes configurations de groupe durant la phase de collaboration, plusieurs modèles 3D avec des caractéristiques similaires (nombre de parties et nombre de triangles) ont été présentés pour éviter les biais liés à l'apprentissage.

Tableau 6.1 – Modèles utilisés durant l'expérimentation

Modèle	Nombre de parties	Nombre de triangles	Taille totale
Rotor	10	62k	4Mo
Camera box	12	67k	5Mo
Car	16	170k	8Mo
Living room	16	200k	9Mo

**Initialisation** Pour chaque phase, l'application a été initialisée par le chargement des parties du modèle dans la bibliothèque d'objets chez chaque participant. Les

parties des objets ont volontairement été positionnés (rotation et homothétie) aléatoirement afin que les utilisateurs aient à manipuler les différentes fonctionnalités. Cette configuration nous permet d’observer l’activité à l’intérieur de chaque groupe durant l’expérimentation. Chaque participant a reçu une image de l’assemblage à réaliser (la tâche à compléter).

**Données collectées** Pour chaque expérimentation et chaque participant, le temps de complètement, le nombre d’évènements générés et l’horodatage de chaque évènement pour observer le complètement de la tâche en termes de vitesse et d’efficacité ainsi que les effets sur le temps d’implication d’un collaborateur selon le nombre de collaborateurs.

L’enregistrement des données commence lorsque le premier évènement sur la scène initialisée est généré (horodatage du premier évènement) ; et il s’arrête lorsque le groupe indique que la tâche à compléter est terminée (horodatage du dernier évènement est considéré).

**Questionnaire** En dehors des données collectées, les participants à devaient remplir un questionnaire basé sur l’expérimentation pour exprimer leurs retours qualitatifs concernant leur expérience (Annexe ??) .

Le questionnaire est inspiré de [Lewis, 1995], qui permet d’évaluer la facilité d’utilisation du système et l’implication dans la collaboration de chacun des participants. En utilisant une échelle de notation sur sept points [Lewis, 1993], (1 : pas d’accord ; 7 : d’accord) pour avoir assez de points de discrimination.

Au cours des différentes sessions collaboratives, l’application a produit plusieurs centaines d’évènements (environ 300 par session). Les expérimentations ont été réalisées sur plusieurs dispositifs notamment un *smartphone* avec une connexion 4G. La Figure 6.1 montre quelques captures d’écran durant une session collaborative sur le modèle Rotor ; et la Figure 6.2 montre les premiers évènements enregistrés dans la base de données. Les boîtes englobantes représentent la sélection des différents collaborateurs pendant la session.

### 6.3.1 Résultats et Discussion

**Analyse des interactions** Les traces des utilisateurs récupérées au cours des expérimentations sont la base du travail d’analyse qui est présenté ici. Ces traces, composées d’évènements générés par les utilisateurs, permettent de savoir qui (Figure

6.3a) a fait quoi (Figure 6.3b) lors des sessions collaborative. Généralement, le « qui » est assez facile à retrouver lors de la récupération des traces. Le « quoi » cependant nécessite que les notifications aient une signification précise et proche du métier. Grâce au travail de découpage et de dénomination des événements effectué en amont, le journal d'évènements (*log*) indique précisément tout ce qui s'est passé lors de la session d'un point de vu métier. Cette fonctionnalité est intéressante dans le contexte de la traçabilité des données et lors d'audits sur l'assemblage.

Figure 6.3 montre deux angles d'enregistrement d'une session sur le modèle *living room*. Au début de la session, beaucoup d'objets sont ajoutés (`meshAddedToSceneEvent`). Seul un utilisateur a ajouté un objet en utilisant la fonctionnalité pour déposer un objet à un endroit spécifique de la scène (`meshDropped`). Le nombre d'évènements concernant la sélection et la désélection est à peu près similaire aux exception. La différence s'explique par le fait que l'évènement de désélection n'est pas déclenché lors d'un changement d'objet sélectionné, car la désélection n'est pas effectuée explicitement par l'utilisateur. Au commencement, les participants ont fortement interagit (jusqu'à 20 évènements en 15 secondes). Cela s'explique par le recours massif à l'ajout d'objets dans la scène pour composer le modèle et la mise à l'échelle de ceux-ci (du au positionnement arbitraire des objets de la bibliothèque). Ensuite, les trois utilisateurs interagissent ensemble durant quelques minutes avant que l'un d'entre eux ne quitte et ne reviennent quelques secondes plus tard (informations récupérées à partir du journal d'évènements lié aux agrégats utilisateurs). Enfin, le nombre d'évènements diminue montrant la fin de l'activité, les utilisateurs finissant la tâche et ajustant les derniers objets.

L'implication d'un utilisateur peut être vue par le prisme de la fréquence de ses contributions et la variété de fonctionnalités utilisées, autrement dit, les différents types d'évènement produits. L'analyse d'une session apporte plusieurs indicateurs tout au long de la session. Par exemple, l'absence d'un utilisateur pendant une longue période peut indiquer une déconnexion. Ou encore, l'utilisation trop fréquente d'un type d'évènement (ou d'un motif d'évènements répété) peut montrer une faiblesse de l'ergonomie de l'interface. Pour ce dernier aspect, on peut prendre l'exemple dans la Figure 6.3b à 45s, on remarque un nombre élevé de `MeshScaledEvent`. A posteriori, nous nous sommes rendu compte que la fonctionnalité était mal calibrée pour l'échelle du modèle et nécessitait donc de s'y reprendre à de nombreuses fois pour réaliser la bonne transformation.

**Questionnaires** Après chaque expérimentation, le participant a rempli directement un questionnaire à propos des phases solo et collaboratives qu’il a effectuées via le formulaire en ligne. Les résultats obtenus sont compilés dans la Figure 6.4 sous la forme de boîte à moustache. Cette représentation est un moyen rapide de figurer le profil essentiel des résultats des mesures quantitatives effectuées. Globalement, les tâches ont été réalisées plus rapidement et plus efficacement de manière collaboration que de manière solo. La facilité d’utilisation et la simplicité de l’interface sont également soulignées positivement par plusieurs utilisateurs. Comme indiqué dans les retours d’expérience négatifs, la stabilité du réseau a parfois amené un peu de frustration chez certains participants. Cependant, les participants ont trouvé que la cohérence de l’environnement lors de la collaboration et la récupération des données était plus qu’acceptable. Cette remarque s’accompagne également du fait que la distribution des données s’est effectuée correctement, leur permettant de coopérer efficacement.

Durant l’une des expérimentations en phase collaborative, nous avons eu un participant avec une latence de plus de 10s à certains moments, mais malgré cela, le groupe nous a notifié que cela n’avait pas affecté la collaboration. Au long des expérimentations, quelques conflits ont été levés sur différentes opérations à différents niveaux. Au niveau réseau (mauvaise version, désynchronisation), la politique en place est d’annuler l’évènement et de resynchroniser les utilisateurs entre eux. Au niveau des utilisateurs (opérations opposées sur le même objet), la résolution du conflit doit passer par un canal externe (chat) pour que les utilisateurs se mettent d’accord.

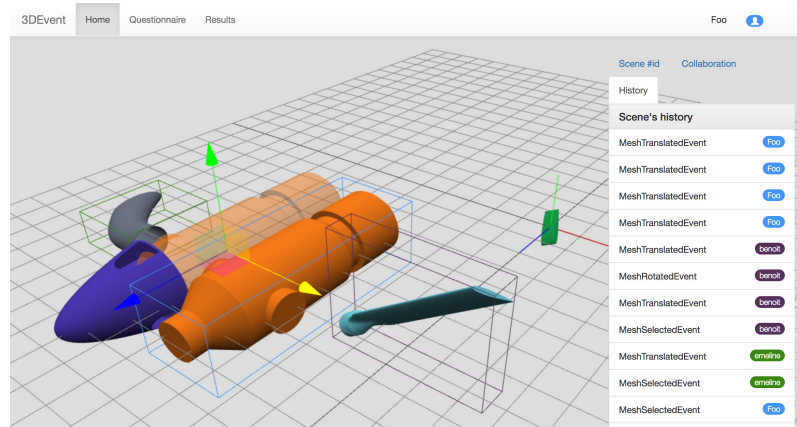
Dans toutes les expérimentations menées, le but a été atteint dans pratiquement le même temps (10-15 minutes). La facilité d’utilisation du système n’est donc pas en reste malgré quelques aspects à améliorer. Rappelons que bien que la complexité des modèles ne soit pas extrême, tous les participants étaient débutants sur le système et n’était pas forcément familier de ce genre d’application. Le fait que l’application soit basée web a également joué en faveur de l’appropriation de l’application car il a semblé assez naturel aux participants de se rendre à l’adresse internet donnée (sans rien installer) pour effectuer les tâches en manipulant un medium (3D) inhabituel pour ce genre de plateforme. De plus, on peut également supposer que le prototype créé pour l’expérimentation correspond bien à l’objectif d’assemblage coopératif d’objets 3D vu que les tâches ont rapidement été réalisées. Sur une échelle de « non-interactif » à « temps-réel » les participants ont qualifié l’application comme « quasi temp-réel ».

La satisfaction générale à propos de l'expérimentation et la satisfaction concernant la collaboration et l'expérience utilisateur montrent que les participants ont positivement apprécié faire de la modélisation collaborative 3D dans un navigateur web. Quant au fait que le nombre d'utilisateur améliore à la fois l'efficacité et la rapidité du complètement de la tâche, les participants ont généralement été d'accord.

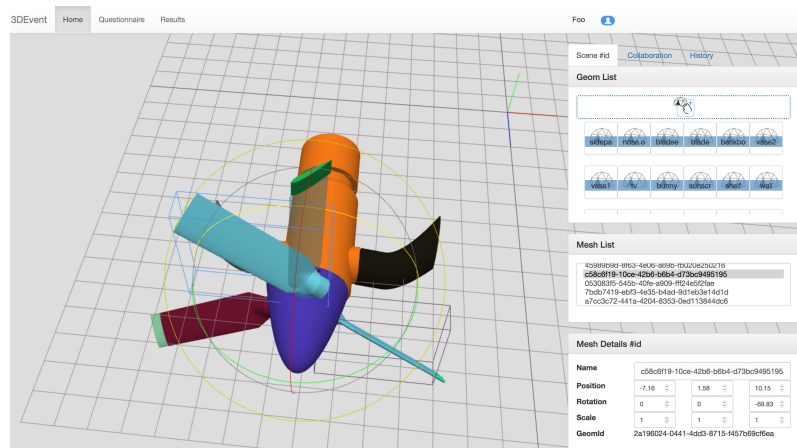
## **6.4 Comparaison entre l'expérimentation 1 et l'expérimentation 2**

### **6.4.1 Résultats**

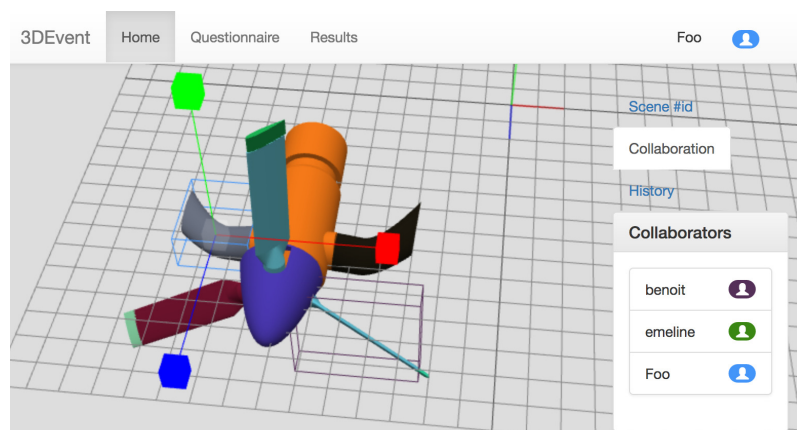
### **6.4.2 Discussion et Conclusion**



(a) Translation (environnement 3D) et visualisation de l'historique (panneau latéral)



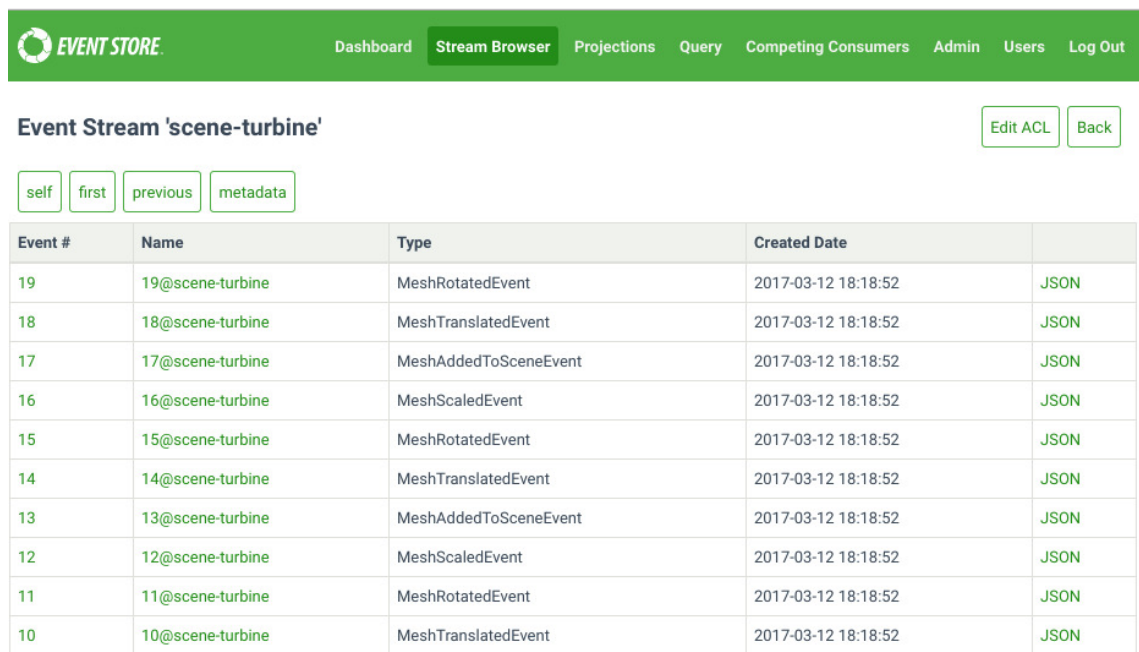
(b) Rotation (environnement 3D) et outils pour la manipulation d'objet 3D (panneau latéral)



(c) Mise à l'échelle (environnement 3D) et liste des collaborateurs (panneau latéral)

FIGURE 6.1 – Interface utilisateur pendant une session collaborative (trois personnes)



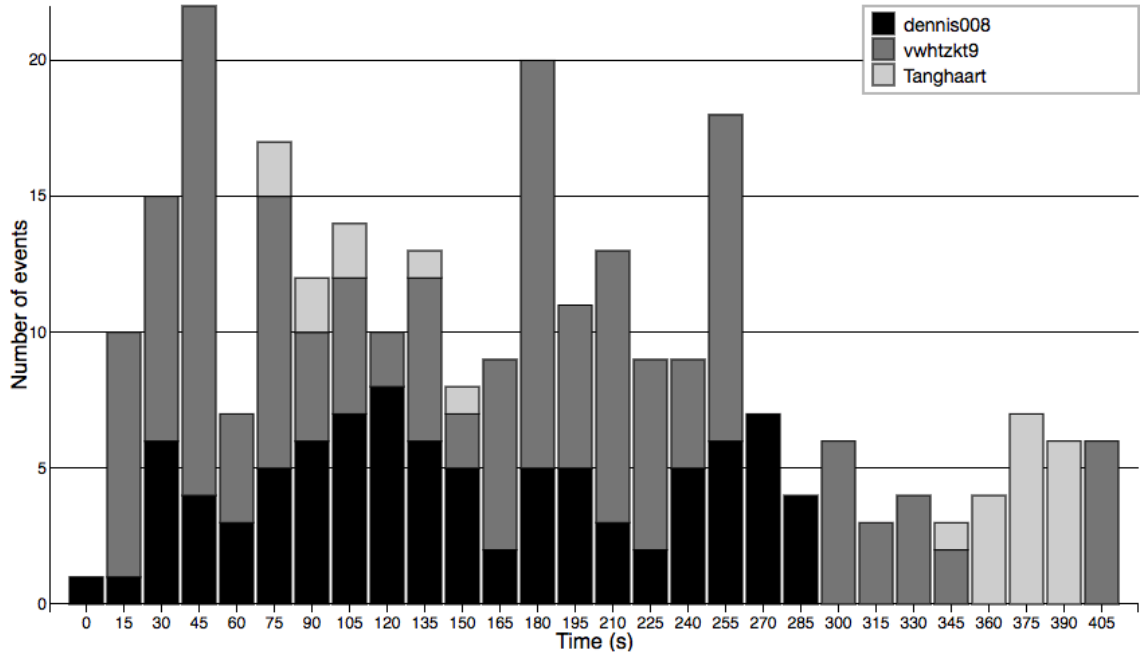


**Event Stream 'scene-turbine'**

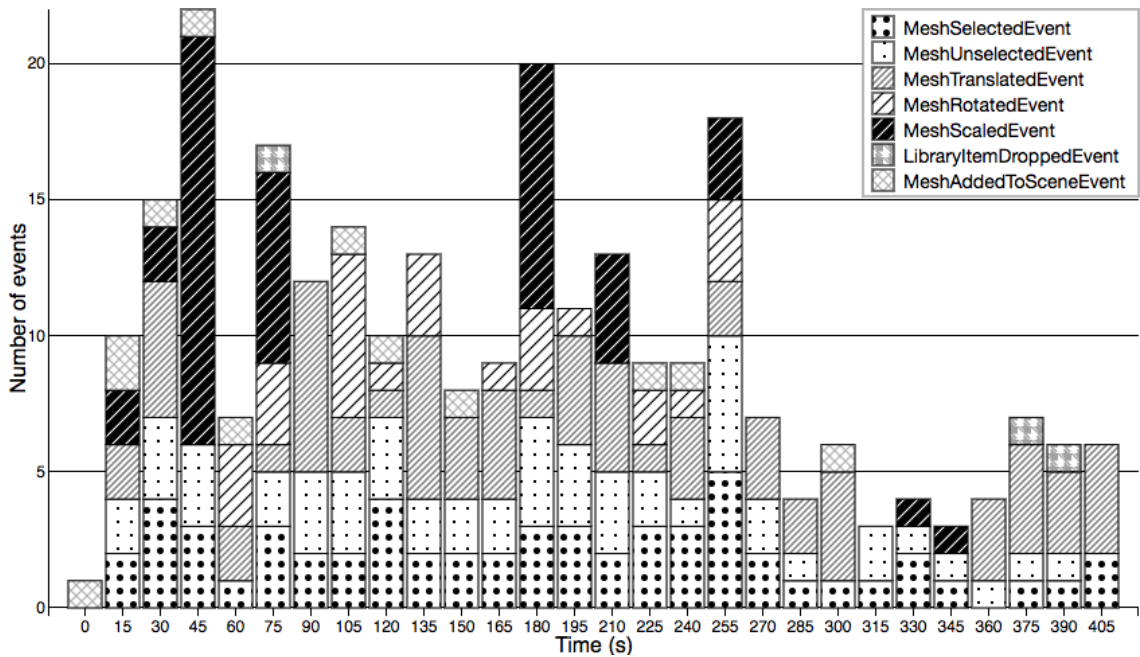
self first previous metadata

Event #	Name	Type	Created Date	
19	19@scene-turbine	MeshRotatedEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
18	18@scene-turbine	MeshTranslatedEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
17	17@scene-turbine	MeshAddedToSceneEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
16	16@scene-turbine	MeshScaledEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
15	15@scene-turbine	MeshRotatedEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
14	14@scene-turbine	MeshTranslatedEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
13	13@scene-turbine	MeshAddedToSceneEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
12	12@scene-turbine	MeshScaledEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
11	11@scene-turbine	MeshRotatedEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON
10	10@scene-turbine	MeshTranslatedEvent	2017-03-12 18:18:52	JSON

FIGURE 6.2 – Persistance long-terme (Event Store®), base de données/outil de monitoring



(a) Par utilisateur



(b) Par type d'évènement

FIGURE 6.3 – Résumé d'une session collaborative au cours du temps

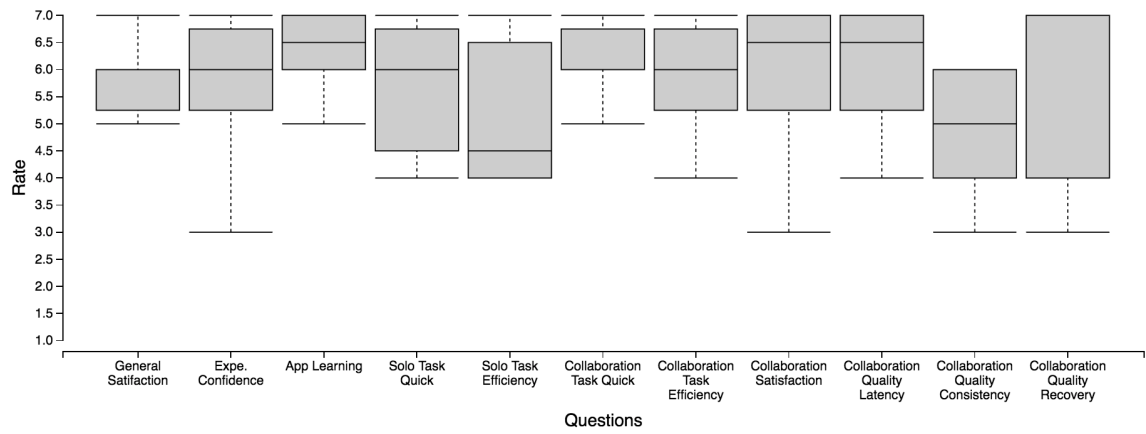


FIGURE 6.4 – Résultats des questionnaires collectés

# Chapitre 7

## Conclusion

# Bibliographie

- [Baran, 2015] BARAN, I. (2015). Under the Hood : How Collaboration Works in Onshape. [3.1](#), [3.1](#)
- [Becher, 2012] BECHER, M. (2012). Interactive Volume Visualization with WebGL. (06). [3.1](#)
- [Behr *et al.*, 2010] BEHR, J., JUNG, Y., KEIL, J., DREVENSEK, T., ZÖLLNER, M., ESCHLER, P. et FELLNER, D. W. (2010). A Scalable Architecture for the HTML5/X3D Integration Model X3DOM. *Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology*, 1(212):185–194. [3.1](#)
- [Calabrese *et al.*, 2016] CALABRESE, C., SALVATI, G., TARINI, M. et PELLACINI, F. (2016). cSculpt : a system for collaborative sculpting. *ACM Transactions on Graphics*, 35(4):1–8. [3.1](#)
- [Callahan *et al.*, 2008] CALLAHAN, S., SCHENK, M. et WHITE, N. (2008). Building a collaborative workplace. *Anecdote : putting stories to work*, pages 1–11. [2.1](#)
- [Chandrasegaran *et al.*, 2013] CHANDRASEGARAN, S. K., RAMANI, K., SRIRAM, R. D., HORVÁTH, I., BERNARD, A., HARIK, R. F. et GAO, W. (2013). The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. *Computer-Aided Design*, 45(2):204–228. [1](#)
- [Chandy *et al.*, 2011] CHANDY, M. K., ETZION, O. et AMMON, R. V. (2011). *The event processing manifesto*. Numéro 10201. [4.1](#)
- [Denning et Pellacini, 2013] DENNING, J. D. et PELLACINI, F. (2013). MeshGit. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4):1. [4.1.4](#)
- [Desprat *et al.*, 2017] DESPRAT, C., CAUDESAYGUES, B., LUGA, H. et JESSEL, J.-P. (2017). Doctoral Symposium : Loosely Coupled Approach for Web-Based Collaborative 3D Design. *In Proceedings of ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems*. [6.1](#), [6.3](#)
- [Desprat *et al.*, 2016] DESPRAT, C., JESSEL, J.-P. et LUGA, H. (2016). 3DEvent : A Framework Using Event-Sourcing Approach For 3DWeb-Based Collaborative

- Design in P2P. In *Proceedings of the 21st International Conference on Web3D Technology - Web3D '16*, pages 73–76. [4.2](#)
- [Desprat *et al.*, 2015] DESPRAT, C., LUGA, H. et JESSEL, J.-P. (2015). Hybrid client-server and P2P network for web-based collaborative 3D design. *WSCG 2015 Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, pages 229–238. [4.2](#), [5.2.2](#), [6.1](#), [6.2](#)
- [Evans, 2003] EVANS, E. (2003). *Domain-Driven Design : Tackling Complexity in the Heart of Software*. Addison Wesley. [3.4.2](#)
- [Gadea *et al.*, 2016] GADEA, C., HONG, D., IONESCU, D. et IONESCU, B. (2016). An architecture for web-based collaborative 3D virtual spaces using DOM synchronization. *2016 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, pages 1–6. [3.1](#)
- [Gotta, 2007] GOTTA, M. (2007). Categorizing Collaboration. [2.1](#)
- [Grasberger *et al.*, 2013] GRASBERGER, H., SHIRAZIAN, P., WYVILL, B. et GREENBERG, S. (2013). A data-efficient collaborative modelling method using websockets and the BlobTree for over-the air networks. *Proceedings of the 18th International Conference on 3D Web Technology - Web3D '13*, page 29. [3.1](#), [3.1](#)
- [Grimstead *et al.*, 2005] GRIMSTEAD, I. J., WALKER, D. W. et AVIS, N. J. (2005). Collaborative visualization : A review and taxonomy. *Proceedings - IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications, DS-RT*, pages 61–69. [3.1](#)
- [Hinze *et al.*, 2009] HINZE, A., SACHS, K. et BUCHMANN, A. (2009). Event-based Applications and Enabling Technologies. *Proceedings of the Third ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems*, pages 1 :1–1 :15. [4.1](#)
- [Houston *et al.*, 2013] HOUSTON, B., CHEN, R., MCKENNA, T., LARSEN, W., LARSEN, B., CARON, J., NIKFETRAT, N., LEUNG, C., SILVER, J., KAMAL-AL-DEEN, H. et CALLAGHAN, P. (2013). Clara.io. *ACM SIGGRAPH 2013 Studio Talks on - SIGGRAPH '13*, pages 1–1. [3.1](#), [3.1](#)
- [Jung *et al.*, 2012] JUNG, Y., BEHR, J., DREVENSEK, T. et WAGNER, S. (2012). Declarative 3D approaches for distributed web-based scientific visualization services. *CEUR Workshop Proceedings*, 869. [3.1](#)
- [Khronos, 2007] KHRONOS (2007). OpenGL ES 2. [3.1](#)
- [Khronos, 2008] KHRONOS (2008). OpenGL ES 3. [3.1](#)

- [Khronos, 2011] KHRONOS (2011). WebGL 1.0. [3.1](#)
- [Khronos, 2016] KHRONOS (2016). WebGL 2.0. [3.1](#)
- [Klamer, 2013] KLAMER, J. (2013). *Conflict resolution in an event sourcing environment*. Thèse de doctorat. [3.4.4](#)
- [Koskela et al., 2015] KOSKELA, T., HEIKKINEN, A., HARJULA, E., LEVANTO, M. et YLIANTTILA, M. (2015). RADE : Resource-aware Distributed Browser-to- browser 3D Graphics Delivery in the Web. *IEEE Wireless and mobile*, pages 500–508. [4.1](#)
- [Lewis, 1995] LEWIS, J. (1995). IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires : Psychometric Evaluation and Instructions for Use. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7(1):57–78. [6.3](#)
- [Lewis, 1993] LEWIS, J. R. (1993). Multipoint scales : Mean and median differences and observed significance levels. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 5(4):383–392. [6.3](#)
- [Lowet et Goergen, 2009] LOWET, D. et GOERGEN, D. (2009). Co-Browsing Dynamic Web Pages. *Proceedings of the 18th International Conference on World Wide Web - WWW '09*, pages 941–950. [3.1](#)
- [Lu et al., 2016] LU, Z., GUERRERO, P., MITRA, N. J. et STEED, A. (2016). Open3D : Crowd-Sourced Distributed Curation of City Models. *Web3D '16 : Proceedings of the 21th International Conference on 3D Web Technology*, pages 87–94. [3.1](#)
- [Morin, 1990a] MORIN, E. (1990a). *Introduction à la pensée complexe*. ESF Editeur. [1](#)
- [Morin, 1990b] MORIN, E. (1990b). Science avec conscience. [2.1](#)
- [Mouton et al., 2011] MOUTON, C., GRIMSTEAD, I. et CARDIFF, U. (2011). Collaborative Visualization Current Systems and Future Trends. *Proceedings of the 16th International Conference on 3D Web Technology*, 1:101–110. [3.1](#)
- [Mouton et al., 2014] MOUTON, C., PARFOURU, S., JEULIN, C., DUTERTRE, C., GOBLET, J.-L., PAVIOT, T., LAMOURI, S., LIMPER, M., STEIN, C., BEHR, J. et JUNG, Y. (2014). Enhancing the Plant Layout Design Process using X3DOM and a Scalable Web3D Service Architecture. [3.1](#)
- [Sons et al., 2010] SONS, K., KLEIN, F., RUBINSTEIN, D., BYELOZYOROV, S. et SLUSALLEK, P. (2010). XML3D – Interactive 3D Graphics for the Web. *Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology*, pages 175–184. [3.1](#)
- [Steiakaki et al., 2016] STEIAKAKI, M., KONTAKIS, K. et MALAMOS, A. G. (2016). Real-Time Collaborative environment for interior design based on Semantics ,

- Web3D and WebRTC. *International Symposium on Ambient Intelligence and Embedded Systems*, pages 22–24. [4.2](#)
- [Stein *et al.*, 2014] STEIN, C., LIMPER, M. et KUIJPER, A. (2014). Spatial data structures for accelerated 3D visibility computation to enable large model visualization on the web. *Proceedings of the Nineteenth International ACM Conference on 3D Web Technologies - Web3D '14*, pages 53–61. [3.1](#)
- [Sun *et al.*, 1998] SUN, C., JIA, X., ZHANG, Y., YANG, Y. et CHEN, D. (1998). Achieving Convergence , Causality Preservation , and Intention Preservation in Real-Time Cooperative Editing Systems. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 5(1):63–108. [4.2](#)
- [Sutter, 2015] SUTTER, J. (2015). A CSS Integration Model for Declarative 3D. *In Web3D '15 : Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*, pages 209–217. [3.1](#)
- [Vernon, 2013] VERNON, V. (2013). *Implementing Domain-Driven Design*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. [3.4.2](#)
- [W3C, 2011] W3C (2011). Extensible 3d (X3D). [3.1](#)
- [Wikipedia, 2013] WIKIPEDIA (2013). Usability engineering. [1](#), [3.2](#)
- [Wu *et al.*, 2014] WU, D., ROSEN, D. W. et SCHAEFER, D. (2014). *Cloud-Based Design and Manufacturing (CBDM)*. [1](#)
- [Xhafa et Poulouvassilis, 2010] XHAFA, F. et POULOVASSILIS, A. (2010). Requirements for distributed event-based awareness in P2P groupware systems. *24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA 2010*, (October):220–225. [4.1.1](#)
- [Young, 2009] YOUNG, G. (2009). Code Better. [3.4.3](#)