



# **Vers une plateforme cartographique web 2D/3D - dynamique pour la participation citoyenne**

**Mémoire**

**Frederick Lafrance**

**Maîtrise en sciences géomatiques - avec mémoire**  
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

# **Vers une plateforme cartographique web 2D/3D- dynamique pour la participation citoyenne**

**Mémoire**

**Frédéric Lafrance**

Sous la direction de :

Sylvie Daniel, directrice de recherche

Suzana Dragicevic, codirectrice de recherche

Sehl Mellouli, codirecteur de recherche

## Résumé du mémoire

Les globes virtuels Web peuvent faciliter la communication entre les urbanistes et les citoyens. Des études récentes ont montré que les représentations 3D plutôt que 2D peuvent être plus efficaces dans la communication de l'information. Cependant, une telle visualisation présente plusieurs défis, y compris le niveau de détail et de réalisme. La compréhension par les citoyens de l'impact de leurs choix lors d'une consultation pourrait être améliorée en exploitant des simulations spatiotemporelles. Pourtant, la 4D (3D + temps) a rarement été intégrée aux plateformes de participation citoyenne. Ainsi, l'objectif principal de cette recherche était de développer une plateforme de cartographie Web combinant des visualisations multidimensionnelles (2D, 3D, 4D) de manière intuitive, afin que les citoyens puissent mieux évaluer et comprendre les enjeux de la consultation. Pour atteindre cet objectif, des lignes directrices de représentation adaptées à la consultation citoyenne ainsi que des simulations spatiotemporelles ont été conçues. Ces concepts ont ensuite été intégrés au sein d'une plateforme de cartographie Web 4D mettant en vedette le globe virtuel Cesium. Des tests utilisateurs ont été réalisés avec 21 participants expérimentés qui ont utilisé un questionnaire intégré à la plateforme pour valider les concepts. Le questionnaire contenait 5 scénarios réalistes simulés de participation citoyenne, dans lesquels les participants ont évalué l'intuitivité des représentations choisies ainsi que les concepts liés à cette recherche. Les résultats ont montré que les informations spatiales partagées au sein des consultations citoyennes peuvent être intuitivement représentées par une combinaison de dimensions 2D, 3D et 4D. De plus, cette combinaison permet également de mieux comprendre les impacts liés aux choix effectués lors de la consultation. La plateforme proposée dans ce projet est un premier pas vers un outil plus complet dédié à la participation citoyenne. Les futurs travaux viseront à utiliser la plateforme dans un contexte réel de consultation citoyenne.

# Abstract

Web virtual globes can facilitate communication between urban planners and citizens. Recent studies have shown that 3D rather than 2D representations can be more effective in communicating information. However, such visualization presents several challenges, including the level of detail, realism and abstraction. Citizens' understanding of the impact of the choices they make during urban planning consultations could be improved by exploiting spatiotemporal simulations. Yet, 4D (3D + time) has rarely been integrated to citizen participation platforms. Therefore, the main objective of this research was to develop a web mapping platform combining multidimensional visualizations (2D, 3D, 4D) in an efficient and intuitive way, so that citizens can better assess and understand the issues of the consultation at stake. To achieve this objective, representation guidelines adapted to citizen consultation as well as spatiotemporal simulations were designed. These concepts were then integrated into a 4D web mapping platform featuring the virtual globe Cesium. User testing was done with 21 experienced participants who used a questionnaire integrated into the platform to validate the concepts. The questionnaire contained 5 simulated realistic case scenarios of citizen participation, in which the participants assessed the intuitiveness of the chosen representations as well as the concepts related to this research. Results showed that spatial information shared within citizen consultations can be intuitively represented through a combination of 2D, 3D and 4D dimensions. Moreover, this combination also offers a better understanding of the impacts related to choices made during the consultation. We consider that the platform proposed in this project is a first step toward a more complete tool dedicated to citizen participation. Future works will aim to use the platform in a real context of citizen consultation.

# Table des matières

Résumé du mémoire.....	III
Abstract .....	IV
Table des matières .....	V
Liste des abréviations .....	VII
Liste des tableaux .....	VIII
Liste des figures .....	IX
Remerciements .....	XVI
Introduction .....	1
1.1    Mise en contexte.....	1
1.1.1    La participation citoyenne et les TIC .....	1
1.1.2    Plateformes cartographiques web de participation citoyenne .....	3
1.2    Problématique.....	7
1.3    Hypothèse.....	9
1.4    Objectifs .....	11
1.4.1    Objectif principal.....	11
1.4.2    Sous-objectifs .....	12
1.5    Méthodologie.....	12
1.6    Cadre opératoire .....	16
1.7    Structure du mémoire .....	17
Chapitre 1 – Directives de représentation 2D et 3D appliquées à la participation citoyenne .....	18
1.1    Revue des approches de représentation 2D et 3D en cartographie.....	18
1.1.1    Approches de représentation 2D .....	20
1.1.2    Approches de représentation 3D .....	28
1.1.3    Critères d'évaluation .....	38
1.1.4    Analyse critériée des approches de représentation 2D/3D .....	40
1.1.5    Directives de représentation 2D/3D pour la participation citoyenne.....	45
1.2    Revue des technologies de rendu 2D/3D Web .....	50
1.2.1    Technologies cartographiques 2D .....	50
1.2.2    Comparaison des technologies cartographiques 2D .....	51
1.2.3    Technologies cartographiques 3D .....	52
1.2.4    Scènes virtuelles .....	53
1.2.5    Globes virtuels.....	57
1.2.6    Comparaison des technologies web de rendu 3D.....	62
1.3    Synopsis du chapitre.....	63
Chapitre 2 – Conception d'un mécanisme de simulation spatiotemporelle 2D/3D.....	65
2.1    Introduction .....	65
2.2    Revue des plateformes cartographiques dynamiques 2D et 3D ou de participation citoyenne sur le web .....	66
2.3    La dimension temporelle .....	71
2.4    Outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle .....	71
2.4.1    Les graphiques.....	72
2.4.2    Le requêtage .....	76
2.4.3    L'animation .....	78

2.5	Méthodes de représentation spatiotemporelle 2D / 3D .....	79
2.5.1	Représentations statiques : le cube espace-temps.....	80
2.5.2	Représentations dynamiques .....	83
2.6	Élaboration d'un mécanisme de simulation spatiotemporelle adapté à une plateforme de participation citoyenne.....	88
2.6.1	Représentation du temps dans le mécanisme de simulation spatiotemporelle .....	88
2.6.2	Méthodes de représentation spatiotemporelle dans le mécanisme de simulation spatiotemporelle.....	89
2.6.3	Outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle dans le mécanisme de simulation spatiotemporelle.....	92
2.7	Conclusion du chapitre.....	93
Chapitre 3 - Réalisation d'un prototype de plateforme web de participation citoyenne .....		95
3.1	Création d'un questionnaire de consultation citoyenne.....	95
3.1.1	Zone à l'étude.....	97
3.1.2	Scénarios de consultation citoyenne mis en œuvre dans le prototype.....	97
3.2	Architecture logicielle et composantes clés .....	117
3.2.1	Le côté serveur (back-end) .....	117
3.2.2	Le côté client (front-end).....	119
3.2.3	Composantes architecturales clés .....	120
3.3	Interface de visualisation et d'interaction.....	123
3.4	Synopsis du chapitre.....	127
Chapitre 4 - Résultats et discussion.....		129
4.1	Finalité et principaux éléments constitutifs des tests.....	129
4.2	Tests de performance du prototype .....	130
4.2.1	Test de performance de la composante 3D.....	130
4.2.2	Test de performance du mécanisme de simulation spatiotemporelle .....	131
4.3	Test d'évaluation du prototype par des utilisateurs .....	132
4.3.1	Contexte de mise en œuvre du test .....	132
4.3.2	Indicateurs et métriques d'évaluation.....	134
4.4	Résultats et analyse des tests utilisateurs.....	137
4.4.1	Les représentations 2D et 3D .....	137
4.4.2	Le mécanisme de simulation spatiotemporelle.....	145
4.4.3	L'interface utilisateur et l'expérience utilisateur.....	151
4.5	Discussion des résultats.....	154
4.6	Synopsis du chapitre.....	160
Conclusion.....		162
1.1	Retour sur les objectifs du projet et la recherche effectuée.....	162
1.2	Contributions à la recherche .....	165
1.3	Perspective .....	167
Bibliographie.....		170
Annexe A.....		181
Questionnaire pour tests utilisateurs .....		181

# Liste des abréviations

**2D** : Deuxième dimension spatiale (i.e. x et y).

**3D** : Troisième dimension spatiale (i.e. x, y et z).

**3DCityDB** : 3D City DataBase, est une base de données CityGML.

**4D** : Troisième dimension spatiale (i.e. x, y, z) et le temps.

**CNB** : Construction de nouveaux bâtiments.

**CPU** : Le processeur (CPU, pour Central Processing Unit, soit Unité Centrale de Traitement) est le cerveau de l'ordinateur.

**CSS** : Cascade Style Sheet, est un document conservant le style associé à une page web.

**DP** : Densité de population.

**FPS** : « Frames per second » en anglais, réfère au nombre d'images par seconde.

**GPU** : La carte graphique (GPU, pour Graphics Processing Unit).

**HTML** : HyperText Markup Language, définit la structure d'une page web.

**LoD1 à LoD3** : Niveaux de détails CityGML. Le niveau 1 représente une simple extrusion, tandis qu'un niveau 3 représente un bâtiment plus détaillé avec les fenêtres, toits.

**NSC** : Niveau de satisfaction citoyenne.

**PCP** : Pistes cyclables passées.

**UI** : Interface utilisateur.

**UL** : Université Laval.

**UMRsu** : Unité Mixte de Recherche en sciences urbaines.

**UX** : Expérience utilisateur.

# Liste des tableaux

Tableau 1 - Catégories d'articles traitant de la représentation 2D et 3D.....	19
Tableau 2 - Synthèse de l'analyse critériée des approches de représentation 2D/3D recensées (CV = Complexité visuelle; SC = Surcharge cognitive; P = Performance; CA = Complexité de l'algorithme; Les symboles « + » et « - » signifient respectivement « favorise » et « ne favorise pas »).....	40
Tableau 3 - Évaluation des scènes virtuelles Three.js et X3DOM et des globes virtuels Web World Wind et Cesium.js pour le rendu Web 3D. L'évaluation des critères s'est faite à partir des symboles suivants : « + » bien adapté, « O » partiellement adapté et « - » insuffisamment adapté. ....	62
Tableau 4 - Répartition des articles traitant de représentations spatiotemporelles 2D et/ 3D ; Visualisation de données temporelles ; et analyses visuelles (Visual Analytics).....	66
Tableau 5 – Questions posées tout au long de l'expérience. Les questions sont regroupées selon leur scénario respectif (l'Annexe A propose les questions relatives à la consultation citoyenne posées dans le cadre de chaque scénario).....	134
Tableau 6 – Ce tableau montre les affirmations posées à la fin de l'expérience regroupées par concept de validation. ....	136
Tableau 7 – Valeurs moyennes et écarts-types calculés sur la base du degré d'accord avec les affirmations relatives au choix de représentation et de combinaison 2D / 3D. ....	143
Tableau 8 – Valeurs moyennes et écarts-types calculés sur la base du degré d'accord avec les affirmations concernant le mécanisme de simulation spatiotemporelle. ....	146
Tableau 9 - Valeurs moyennes et écarts-types calculés sur la base du degré d'accord avec l'affirmation concernée par le UI et UX. ....	153



# Liste des figures

Figure 1 - Méthodologie proposée pour aboutir au développement d'une plateforme de cartographie web. ....	15
Figure 2 – Exemple d'une cartographie avec un nombre de points élevés (100 000 points et plus). Chaque point représente un tweet. Chaque tweet possède une couleur représentant une catégorie et un sujet récurrent identifié à partir de l'analyse de milliers de tweets, et ce sur une période de temps défini [86]. ....	21
Figure 3 – Regroupement d'éléments spatiaux d'une même catégorie selon l'échelle spatiale; le chiffre dans le point sert à indiquer le nombre d'éléments regroupés [46]. ....	22
Figure 4 – Regroupement d'éléments spatiaux d'une même catégorie (représentés par une couleur) selon l'échelle spatiale; la taille du point s'ajuste proportionnellement en fonction du nombre d'éléments regroupés. Par exemple, une plus grosse taille signifie qu'il y a beaucoup d'éléments [46]. ....	23
Figure 5 – Exemple d'utilisation d'une interpolation par « hot spot ». Dans cet exemple, les points chauds (plus foncés) représentent une forte activité liée à l'usage des médias sociaux à Tyrol, en Italie [75]. ....	23
Figure 6 – Exemple de représentation sous forme de régions. Les zones rouge et bleu représentent respectivement une insatisfaction à l'égard des services offerts par la Ville. ....	24
Figure 7 – Exemple d'application d'une taille différente pour une représentation par régions. La distorsion est plus importante dans les régions où le phénomène est plus important. La figure de gauche présente le nombre de tweets par cellule et les couleurs représentent des catégories de discussion relatives à des réseaux sociaux. La figure de droite présente des régions avec plus ou moins de distorsion en fonction du nombre de tweets par cellule. Une description plus détaillée est donnée dans les études de [92]. ....	25
Figure 8 – Exemple d'une cartographie de l'état de la circulation à Montréal. Une couleur verte signifie que la circulation est fluide, à l'inverse une couleur rouge signifie que la circulation est congestionnée (Google Maps, 2018). ....	26
Figure 9 – Exemple d'une flow map qui montre le nombre de déplacements durant sept jours (29 janvier au 5 février 2014) de Los Angeles à d'autres endroits en Amérique du Nord. Une trajectoire plus épaisse montre que cet itinéraire fut plus populaire pendant cette période [88].	27
Figure 10 – Représentation 2D de données bathymétriques : les lignes de couleur représentent des courbes de niveau associées à l'élévation d'un niveau d'eau [28]. ....	28
Figure 11 – Cette figure illustre la popularité des quartiers basée sur l'analyse d'opinions extraites depuis les réseaux sociaux. Les valeurs de popularité sont normalisées pour chaque zone (la couleur rouge indique une forte popularité tandis qu'une couleur bleue indique l'inverse) [55]. ....	29
Figure 12 – Représentation de la popularité des quartiers basée sur l'éclairage en utilisant la méthode visual lightning. À gauche, une vue sur le collège Trinity College à Dublin. À droite, le collège reçoit un niveau d'éclairage représentatif de sa popularité extraite à partir d'images géolocalisées publiées sur les réseaux sociaux [55]. ....	29
Figure 13 – À gauche, les bâtiments découpés suivant des voxels. À droite, une couleur a été associée à ces voxels pour montrer l'intensité du bruit causé par la circulation routière. Une couleur rouge correspond à un fort bruit alors qu'une couleur bleue correspond à un faible bruit [67]. ....	30

Figure 14 – À gauche un niveau de réalisme élevé et à droite un niveau de réalisme faible (niveau d'abstraction plus élevé) d'une ville [24]. ..... 32

Figure 15 – Ces deux images illustrent deux façons utilisées par [54] pour représenter des éclairs, à gauche une façon photo-réaliste et à droite avec des lignes directes. .... 32

Figure 16 – Nuage de points « point cloud » acquis avec un capteur LiDAR. Le nuage de point a été normalisé et classifié, la couleur indique à quelle classe d'altitude le point appartient. La figure encadrée en rouge au bas à droite de la figure principale correspond à la zone rouge encadrée zoomée [96]. ..... 33

Figure 17 – La figure montre les signaux de plusieurs milliers d'enregistrements (« check-in ») survenus au centre principal de Disney sur une période de 7 jours. Les couleurs rose et bleu indiquent respectivement une faible et forte précision du signal GPS. La hauteur du point est caractérisée par l'intensité du signal, c'est-à-dire la popularité d'un même enregistrement, par exemple [97]. ..... 34

Figure 18 - Courbes de Bézières verticale : Visualisation 3D des modèles de flux d'appels téléphoniques. Les points verts sont les emplacements des stations de base mobiles. La hauteur et la couleur (respectivement rouge pour très intense ; orange pour intense et jaune pour normal) des arcs représentent le volume relatif des appels téléphoniques. Les arcs hauts et étroits montrent une forte communication d'appels dans un espace intra-urbain proche. Chaque arc représente un flux reliant deux stations mobiles [95]. ..... 35

Figure 19 – Cette visualisation montre les bateaux et avions-cargos entrants (bleu) et sortants (orange) de Singapour [98]. Une plus grande épaisseur de trait montre une plus grande activité d'import-export. .... 35

Figure 20 - Visualisation des zones dynamiques "sources" de l'appel téléphonique (rouge), des zones "creuses" (bleu) et des zones "équilibrées nulles" (jaune) dans l'environnement 3D-SIG. Les trois figures représentent trois périodes de la journée : en haut-gauche la tranche horaire de 12h00 à 1h00 AM, en haut-droite la tranche horaire de 6 à 7 AM et en bas la tranche horaire de 3 à 4 PM [95]. ..... 37

Figure 21 - Modèle par voxels. La couleur des voxels illustre la température de l'eau à différentes profondeurs [100]. ..... 38

Figure 22 – Directives pour sélectionner une approche de représentation de l'information partagée dans le cadre d'une consultation citoyenne..... 49

Figure 23 - Comparaison des technologies D3 (en rouge), Google Maps API (en bleu), Leaflet (en vert) et OpenLayers (en mauve) pour leur capacité à réaliser des tâches spécifiques [103]. ..... 52

Figure 24 - Comparaison des technologies D3 (en rouge), Google Maps API (en bleu), Leaflet (en vert) et OpenLayers (en mauve) en terme du niveau de satisfaction des utilisateurs [103]. ..... 52

Figure 25 – Interface d'une scène X3DOM par les auteurs [16]..... 55

Figure 26 – Exemple d'une interface de la scène virtuelle Three.js par [28]. ..... 56

Figure 27 – Interface de Web World Wind. .... 59

Figure 28 – Démo NewYork pour les tuiles 3D de Cesium. .... 61

Figure 29 – Interface principale du globe virtuel Cesium.js. .... 61

Figure 30 – Visualisation des courants marins sous forme d'un champs vectoriel en 3D [108]..... 68

Figure 31 – Exemple de graphique à nuage de points « Scatter plot ». Les données sont distribuées dans un système cartésien où une valeur (par exemple la quantité de précipitations) et le temps sont représentés respectivement sur l'axe des y et l'axe des x [90]. ..... 73

Figure 32 – Exemple de graphiques à lignes, où deux lignes sont utilisées pour montrer respectivement l'année 2011 en rouge et l'année 2012 en bleu. Les lignes montrent le nombre de voyages faits en taxi sur une période d'un an [37]. ..... 73

Figure 33 – Exemple de graphiques à barres (gauche) et Spike graph (droite). La longueur des barres est utilisée pour montrer la valeur associée à une variable donnée. Elles permettent de mettre en

évidence les plus grandes valeurs tandis que les Spikes (i.e. barres moins larges) sont utilisés lorsqu'il y a beaucoup de données temporelles [36]..... 74

Figure 34 – Exemple de graphiques silhouettes. Le graphique de gauche est le graphique Silhouette Graph et celui de droite est le graphique Circular Silhouette Graph. Dans le cas de ces graphiques, l'aire sous la courbe est remplie. Ils sont utilisés pour favoriser la comparaison de plusieurs séries temporelles qui peuvent être mises côte à côte [90]. ..... 75

Figure 35 – Le graphique ThemeRiver montre les changements de plusieurs thématiques (sujets) dans le temps. Chaque thématique est représentée par une couleur et une épaisseur et cette dernière varie dans le temps [90]...... 76

Figure 36 – Cette figure montre le requêtage d'une période spécifique à visualiser. L'utilisateur utilise le graphique en haut à droite pour sélectionner la période qu'il souhaite visualiser [102]..... 77

Figure 37 – La figure montre le requêtage d'une zone spécifique à visualiser. L'utilisateur utilise des outils de dessin pour construire la zone où il souhaite analyser les données [102]. ..... 78

Figure 38 – Succession de couches spatiotemporelles où chaque couche fait référence à un moment dans le temps  $t_i$ . Ici, la teinte et l'intensité de la couleur de l'objet (un cube) sont associées à une variable sémantique. La valeur de cette variable change à chaque pas de temps, passant du bleu pâle au temps T1 au bleu foncé au temps T3..... 79

Figure 39 – À gauche, le cube espace-temps représente des tremblements de terre (la taille représente l'intensité du tremblement) sur une période de temps, où les axes x et y permettent de localiser la position du tremblement de terre et l'axe des z le moment où il est survenu [109]. À droite, des trajectoires sont imbriquées dans le cube espace-temps pour visualiser le mouvement d'un objet dans le temps. .... 81

Figure 40 –La figure représente une interpolation 3D apportée à un ensemble de points, le résultat obtenu est un ensemble de voxels. Un voxel ayant une couleur rouge présente une grande activité téléphonique. Par conséquent il y a une plus grande probabilité d'appels téléphoniques pour ces heures. La méthode utilisée est l'estimation spatiotemporelle de la densité de Kernel [95]. .... 82

Figure 41 – Une variante du cube espace-temps permet de visualiser des trajectoires comme des bandes 3D empilées avec une couleur pour représenter une variable sémantique, ici la vitesse [109]. 83

Figure 42 – Cette figure montre un type de changement existentiel où il y a une alternance entre les modèles urbains 3D visualisés. Chaque modèle représente le centre-ville à différents moments dans le temps : a) 1927, b) 1966; c), d) et e) 2000 avec différents niveaux de réalisme [30]. ... 85

Figure 43 – Cette figure montre un changement de population entre 1992 et 2012 pour des quartiers d'une ville. La variation de la population est caractérisée par un changement sémantique manifesté à travers la hauteur. La couleur et l'intensité sont utilisées pour discriminer les quartiers ayant une grande (rouge) et faible (blanc) population [126]. ..... 86

Figure 44 – Étapes pour aboutir à la réalisation d'une représentation dynamique à partir d'une information spatiotemporelle..... 91

Figure 45 - Interface du mécanisme de simulation spatiotemporelle et ses éléments : cartographie et animations, graphique et axe de temps. .... 93

Figure 46 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru, pour chaque couche d'information spatiale utilisée au scénario #2, afin d'aboutir à la sélection d'une directive de représentation. Chaque chemin est représenté à l'aide d'une couleur. Les pistes cyclables actuelles correspondent à la couleur verte ; les PCP à la couleur orange ; les bâtiments 3D à la couleur bleue ; le pourcentage des pistes cyclables à la couleur rouge ; les limites administratives à la couleur mauve ; b) le chemin parcouru pour les pistes cyclables passées afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle..... 100

Figure 47 – Scénario 1 et 2 avec une vue 2D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène contient le pourcentage de pistes cyclables représenté par la région 2D (respectivement en jaune et en orange pour les quartiers Ville-Marie et le Sud-Ouest de la ville de Montréal). Les pistes

	cyclables pour l'année en cours sont représentées par des lignes vertes, alors que les pistes cyclables pour les années passées sont en orange ; .....	101
Figure 48 - Scénario 1 et 2 avec une vue 2D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène contient : les limites administratives représentées par une région 2D blanche avec transparence ; les pistes cyclables pour l'année en cours sont représentées par des lignes vertes, alors que les pistes cyclables pour les années passées sont en orange ; le graphique montre l'évolution des pistes cyclables construites au fil du temps sous forme d'une courbe orange. ....		102
Figure 49 – Scénario 1 et 2 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène contient : les bâtiments 3D sans texture ; le pourcentage de pistes cyclables représenté par la région 3D (respectivement en jaune et en orange pour les quartiers Ville-Marie et le Sud-Ouest de la ville de Montréal) ; les pistes cyclables pour l'année en cours représentées par des lignes vertes ; les pistes cyclables pour les années passées représentées en orange. Le graphique montre l'évolution des pistes cyclables construites au fil du temps sous forme d'une courbe orange. ....		103
Figure 50 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru (en bleu pâle) pour le NSC du scénario #3, afin d'aboutir à une sélection d'une directive de représentation. b) montre le chemin parcouru pour le NSC afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle. ....		105
Figure 51 - Scénario 3 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène contient : les bâtiments 3D sans texture ; le NSC représenté par le modèle urbain encodant une couleur (respectivement en rose et en bleu pâle pour les quartiers Ville-Marie et le Sud-Ouest de la ville de Montréal) ; les pistes cyclables pour les années passées représentées en orange. Le graphique montre 1) l'évolution au fil du temps des pistes cyclables sous forme d'une courbe orange et 2) l'évolution au fil du temps du NSC. ....		106
Figure 52 - D'une manière générale, cette grande figure illustre le scénario 3 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Il y a quatre sous-figures annotées d'une lettre et chacune correspond au NSC à un moment donné dans le temps pour les quartiers, respectivement, de Ville-Marie et du Sud-Ouest de Montréal. Le NSC est représenté par un modèle urbain encodant une couleur pour chacun des arrondissements. Une couleur rose signifie un NSC insatisfaisant, mauve pour indifférent, bleu pâle pour satisfait et bleu pour très satisfait. La figure a) montre le NSC en 2013, Ville-Marie est le quartier ayant un NSC en bleu pâle et le Sud-Ouest est le quartier ayant un NSC en rose ; la figure b) montre le NSC en 2014, Ville-Marie est le quartier ayant un NSC en bleu et le Sud-Ouest est le quartier ayant un NSC en mauve ; la figure c) montre qu'il y a une absence de données pour l'année 2015, ainsi les bâtiments ont leur couleur par défaut (le gris) ; la figure d) montre le NSC en 2016, Ville-Marie est le quartier ayant un NSC en rose et le Sud-Ouest est le quartier ayant un NSC en bleu pâle ; les pistes cyclables actuelles sont représentées par des lignes vertes ; alors que les pistes cyclables pour les années passées sont en orange ; les limites administratives des deux arrondissements sont représentées par une région 2D blanche transparente. ....		107
Figure 53 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru (en mauve) pour les PCF du scénario #4, afin d'aboutir à une sélection d'une directive de représentation. b) montre le chemin parcouru pour les PCF afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle. ....		109
Figure 54 – Scénario 4 avec une vue 3D et le style réaliste activé pour le fond de carte. Cette image montre les éléments dans la scène. Les PCF sont représentées par des lignes 2D encodant un dégradé de bleu (respectivement bleu pâle, turquoise et bleu pour 2018, 2019 et 2020). Le graphique montre, à l'aide de colonnes, le nombre de PCF pour chaque année. La couleur d'une barre représente la même couleur que son homologue spatial dans la scène. ....		110
Figure 55 - Scénario 4 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène montre les PCF représentées par des lignes 2D encodant un dégradé de bleu (respectivement bleu pâle, turquoise et bleu pour 2018, 2019 et 2020). Le graphique montre, à l'aide de colonnes, le		

nombre de PCF pour chaque année. La couleur d'une barre représente la même couleur que son homologue spatial dans la scène.....	111
Figure 56 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru, pour chaque couche d'information spatiale utilisée au scénario #5, afin d'aboutir à une sélection d'une directive de représentation. Chaque chemin est représenté à l'aide d'une couleur. Les CNB correspondent à la couleur bleue ; les secteurs à la couleur gris foncé; la DP à la couleur verte ; b) le chemin parcouru pour les CNB, les secteurs et la DP afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle.....	114
Figure 57 –D'une manière générale, cette figure représentent deux perspectives différentes pour la même scène du scénario 5. Dans cette figure, la vue 3D et le style réaliste pour le fond de carte sont activés. Cette scène contient : les bâtiments 3D avec texture ; la CNB est représenté par des modèles urbains (respectivement bleu pâle pour 2020, turquoise pour 2025 et bleu pour 2030) ; les colonnes (une colonne pour chaque secteur) du graphique encodent une couleur correspondant à une valeur de DP (respectivement rouge pour fortement densifié, orange pour plutôt densifié, jaune pour moyennement densifié, vert pâle pour peu densifié et vert foncé pour très peu densité).	115
Figure 58 - D'une manière générale, cette figure illustre le scénario 5 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Il y a trois sous-figures annotées d'une lettre et chacune illustre la CNB et la DP à un moment dans le temps. La CNB est représentée par un modèle urbain encodant un dégradé de bleu pour chacune des périodes (respectivement bleu pâle, turquoise, et bleu pour 2020, 2025 et 2030) ; la DP est représentée par des régions 3D en forme de demi-sphère. Chacune de ces demi-sphères encode une couleur correspondant à une valeur de DP. Les couleurs possibles pour la DP sont (rouge pour fortement densifié, orange pour plutôt densifié, jaune pour moyennement densifié, vert pâle pour peu densifié et vert foncé pour très peu densité) ; la figure a) montre la CNB et la DP pour 2020 ; la figure b) pour 2025 et la figure c) pour 2030.....	116
Figure 59 - Scénario 5 avec une vue 3D et le style réaliste activé pour le fond de carte. Cette scène contient : les bâtiments 3D avec texture ; la CNB est représentée par des modèles urbains (respectivement bleu pâle pour 2020, turquoise pour 2025 et bleu pour 2030) ; le bâtiment illuminé en fuchsia correspond à un bâtiment inapproprié qui a été sélectionné par l'utilisateur ; Architecture logicielle et composantes clés du prototype .....	117
Figure 60 – Architecture logicielle du prototype de cartographie web de participation citoyenne...	120
Figure 61 – Interface du prototype EMontrealMap. Le questionnaire avec les questions auxquelles les utilisateurs doivent répondre (ici question #1) se trouve à gauche (encadré rose); l'entête de l'interface se trouve en haut (encadré bleu), la scène 2D/3D au centre (encadré orange); l'horloge au bas à gauche (encadré jaune) et l'axe de temps (encadré en vert) au bas de l'écran. ....	123
Figure 62 – Fonctionnalités de la barre d'outils en haut à droite de la scène.....	124
Figure 63 – Affichage du thème sombre. Cette figure montre le centre-ville de Montréal avec le fond de carte sombre de MapBox et les bâtiments sans texture. Plus de bâtiments sont affichés simultanément. Un bâtiment est représenté en bleu, car il a été sélectionné. ....	124
Figure 64 – Affichage du thème normal. Cette figure montre le centre-ville de Montréal avec le fond de carte Aerial Labels de Bing et les bâtiments avec texture. Moins de bâtiments peuvent être affichés simultanément. Un bâtiment est représenté en bleu, car il a été sélectionné. ....	125
Figure 65 – Interaction avec la scène. La figure montre plusieurs bâtiments représentés en bleu et sélectionnés grâce à la fonctionnalité (CTRL + clique). ....	126
Figure 66 – La figure montre la fenêtre « introduction en cours » (encadré rouge) lorsque la caméra est contrôlée et déplacée automatiquement pour configurer la visualisation de manière cohérente avec la situation géographique de la consultation. Le graphique (encadré orange) est également affiché présentant de manière différente les informations associées aux couches spatiotemporelles. ....	127

Figure 67 – Tests utilisateurs dans un cours du Département des sciences géomatiques à l’Université Laval. ....	133
Figure 68 – Le niveau d’expérience des 21 utilisateurs avec l’utilisation de plateformes similaires de cartographie web. Sur l’axe des « x », un niveau d’expérience de 1 signifie « Aucunement expérimenté » ; 2 pour « Peu expérimenté » ; 3 pour « plutôt expérimenté » ; 4 pour « expérimenté » ; 5 pour « très expérimenté ». Sur l’axe des « y » figure le nombre de participants pour chaque catégorie. ....	133
Figure 69 - L’image du haut montre un aperçu de la scène dans le cadre du scénario #3. Le graphique au bas de l’image montre la perception des participants à l’égard de la représentation du NSC à l’aide des modèles urbains. ....	138
Figure 70 - L’image du haut montre un aperçu de la CNB (construction de nouveaux bâtiments) dans le cadre du scénario #5. Au bas, le graphique à pointe de tartes montre la répartition des avis pour la représentation de la CNB à l’aide de modèle naturel et urbain. ....	140
Figure 71 - L’image du haut montre un aperçu de la DP dans le cadre du scénario #5. Au bas, le graphique à pointe de tartes montre la répartition des avis pour la représentation de la DP (densité de population) à l’aide d’une demi-sphère. ....	141
Figure 72 – Histogramme montrant la distribution des avis relatifs à l’affirmation #2 portant sur deux niveaux de réalisme pour les bâtiments et le fond de carte : sombre-abstrait et réaliste. ....	144
Figure 73 – Histogramme montrant le nombre de votes attribué à chaque élément graphique du scénario #3. ....	145
Figure 74 – Distribution des avis pour l’affirmation #6. ....	149
Figure 75 - Histogramme montrant la distribution des avis associés à l’affirmation #7 portant sur les introductions imposées à chaque scénario de consultation. ....	153

*À ma mère.*

# Remerciements

La maîtrise fut pour moi une aventure à la fois passionnante et ambitieuse. Une série d'événements remplie d'échecs, de réussites, de connaissances et d'amitié. Une route parsemée d'embuches et remplie de mauvaises et de bonnes décisions pour se rendre à destination qui, après tout, se traduit en un sentiment d'accomplissement extraordinaire.

Au cours de ces deux dernières années, j'ai beaucoup appris, que ce soit sur le plan personnel, professionnel ou académique. La maîtrise a été pour moi un cheminement qui m'a fait progresser. La maîtrise m'a offert plusieurs opportunités, et j'en suis très reconnaissant. À ce sujet, je remercie ma directrice de recherche Sylvie Daniel pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur un projet de recherche qui me passionne. Ses conseils et ses commentaires sont toujours très pertinents, sans quoi, je n'aurais certainement pas autant appris. Je tiens à souligner son dévouement, sa rigourosité et sa capacité à conseiller judicieusement. Je me sens très privilégié d'avoir été son étudiant. Je tiens à remercier également ma codirectrice Suzana Dragicevic pour m'avoir accueilli dans son laboratoire de recherche situé à Simon Fraser University à Vancouver au Canada. Ses conseils, son aide et sa présence ont aussi été grandement appréciés. Je tiens à remercier aussi mon codirecteur de recherche Sehl Mellouli pour les grandes discussions et réflexions que nous avons eues lors de nos rencontres. Merci à ma collègue Amal Marzouki pour son aide et son dévouement envers notre projet. Amal, tu es une collègue rigoureuse et ce fut très enrichissant de pouvoir collaborer. Merci au professeur Frédéric Hubert pour son aide et ses conseils sur le plan technologique. Enfin, merci à ma conjointe pour son support tout au long de ma maîtrise ainsi que de sa capacité à toujours trouver les bons mots.

Finalement, merci aux partenaires de cette recherche pour leur collaboration et leur appui financier : UMRsu, Thales Recherche et Technologie Canada, Mitacs Accélération, la ville de Montréal et K2 Géospatial.



# **Introduction**

## **1.1 Mise en contexte**

### **1.1.1 La participation citoyenne et les TIC**

Selon André et al. (2012), la participation citoyenne se définit comme suit : « La participation citoyenne vise à renforcer l'engagement des citoyens dans les processus de prise de décision portant sur des choix significatifs qui toucheront leur communauté ». En d'autres mots, c'est de faire valoir la démocratie. C'est ce que [1] ont considéré dans leur étude, et ils sont arrivés à la conclusion suivante : « La participation citoyenne permet de renforcer la démocratie et l'intérêt public à travers les opportunités d'implication et d'intégration qu'elle offre aux citoyens ». Dans un processus de participation citoyenne (PPC), le citoyen veut faire part de son contexte de vie, c'est-à-dire exposer ses problèmes, ses intentions, ses objectifs, etc. Le citoyen veut également avoir accès à de l'information crédible et de qualité. Il veut aussi visualiser avec transparence l'état de sa ville dans le temps [2]. En effet, les citoyens sont concernés par l'esthétique qu'aura leur ville si des changements sont implémentés [3]. Par conséquent, le citoyen veut suivre au fil du temps l'évolution de sa ville et l'impact de sa participation sur cette évolution [4], [5]. De plus, il veut être impliqué dans les prises de décision quant aux projets à réaliser ou à reporter tout en se basant sur son propre contexte de vie. Renforcer la participation citoyenne permettrait également d'augmenter la confiance des citoyens envers leur gouvernement et d'augmenter le degré d'influence du citoyen dans le processus de prise de décision. Cela rejoindrait un des objectifs de la participation citoyenne qui est d'augmenter le nombre de citoyens engagés [4].

De leur côté, pour favoriser la participation des citoyens, les décideurs doivent fournir toutes les informations nécessaires pour aider les citoyens à s'impliquer davantage dans les processus (budget, projets, contraintes, feedback etc.)[6]. Ils doivent également assurer une communication bidirectionnelle avec le public dans les activités de consultation et de planification spatiale [7]. D'autre part, ils ont besoin de plus d'information sur le contexte des citoyens pour mieux répondre à leurs attentes et suivre l'évolution du PPC, pour ainsi mieux comprendre les tendances et les enjeux.

Les méthodes de consultation traditionnelles telles que les questionnaires papier ou les rencontres de consultation publique, quoiqu'encore utilisées aujourd'hui, ne favorisent pas l'accessibilité ou encore l'anonymat des participants. Ces méthodes de participation sont presque toujours tenues dans un endroit fixe et à une heure fixe, souvent lorsque les gens sont au travail ou le soir, lorsque d'autres engagements les empêchent d'assister aux réunions [8] [9]. Les technologies et plus précisément les technologies de l'information et de la communication (TIC) présentent une réelle alternative. Cela est d'autant plus vrai aujourd'hui, car les technologies (e.g. téléphones intelligents, internet, ordinateurs, tablettes...) sont plus accessibles aux citoyens. Bien que la consultation citoyenne puisse se faire au moyen d'un téléphone intelligent ou bien d'une tablette, seul l'ordinateur sera considéré dans le cadre de ce projet de recherche.

La participation citoyenne au moyen des TIC est appelée « e-Participation » ou participation citoyenne électronique. Il s'agit de l'utilisation des nouvelles technologies pour faciliter le PPC, le rendre plus inclusif et assurer l'engagement et l'implication des parties prenantes de façon productive et constructive [10]. [11] définissent la e-Participation comme « l'utilisation des TIC pour élargir et approfondir la participation citoyenne, en permettant aux citoyens de se connecter entre eux et avec leurs représentants élus ». Parmi les technologies recensées jusqu'à ce jour, les technologies basées sur le web offrent beaucoup de potentiel [12]. Elles permettent de rallier virtuellement un grand nombre d'utilisateurs qui, à la base, étaient séparés géographiquement. L'anonymat est également un autre facteur du web qui rend certains utilisateurs plus confortables au moment de faire part de leurs opinions [12]. Parmi les technologies web actuelles, celles qui s'avèrent les plus pertinentes pour favoriser les PPC

sont : les wikis, les réseaux sociaux (Facebook, blogues, twitter...), et les outils de géovisualisation tels que les SIG et la cartographie numérique [12], [13]. Les outils de géovisualisation sont intéressants dans un contexte où la dimension spatiale est mise de l'avant, par exemple en aménagement et planification urbains, donné qu'environ 80% des informations partagées possèdent une composante spatiale [14]. Dans ce sens, [14] notent le manque de recherches qui exploitent le potentiel de la géomatique pour le développement des villes et communautés intelligentes, pour lesquelles la participation citoyenne constitue une composante clé. Ainsi, il est pertinent d'explorer cette voie visant à renforcer l'utilisation de la géomatique et des outils de géovisualisation pour favoriser la participation citoyenne.

### **1.1.2 Plateformes cartographiques web de participation citoyenne**

La cartographie Web fait partie des outils de géovisualisation favorisant la participation citoyenne, en offrant notamment une plus grande accessibilité [15], [16]. Il suffit d'avoir un accès à internet pour pouvoir participer, que ce soit via un téléphone intelligent, une tablette ou un ordinateur. La littérature propose plusieurs cas d'étude montrant les bénéfices de la cartographie web pour favoriser les initiatives participatives dans les villes. Un premier cas est présenté par [8]. Il concerne la plateforme traduite de l'anglais « Connaissance du quartier Los Angeles » et illustre l'usage de la cartographie 2D web comme outil de communication pour donner du pouvoir au public. L'objectif de la plateforme est de rendre accessibles les archives du gouvernement à travers une cartographie web. Un autre cas d'usage concerne l'Université de Chicago en Illinois où il existe une application web permettant à la communauté étudiante de visualiser des cartographies 2D et d'émettre des commentaires à propos de la vie sur le campus [12]. Un autre cas d'étude intéressant concerne une initiative de la ville de Manchester au Royaume-Uni en 2006. La ville a mis en place une plateforme en ligne permettant aux citoyens de signaler les problèmes environnementaux rencontrés dans leur ville (leur site s'intitule Environnement on Call). Cette plateforme a été étudiée par [9]. Les citoyens peuvent, au moyen d'une cartographie web 2D, localiser la position exacte d'un problème qu'ils veulent signaler. Ils peuvent choisir la catégorie à laquelle appartient le problème et fournir des détails sur celui-ci. Selon [9], cette façon de faire a permis de traiter ces problèmes plus efficacement, car l'information se dirige maintenant directement à l'équipe

chargée de leur prise en charge. D'autres fonctionnalités au sein de la plateforme permettent de soutenir et d'améliorer le dialogue ouvert et transparent entre la ville et ses citoyens, axé sur la planification et la régénération de l'espace. Ainsi, les citoyens peuvent discuter de nouvelles propositions d'aménagement ou identifier les problèmes liés à la régénération de l'espace au sein de leur communauté. Les utilisateurs peuvent naviguer dans la carte en zoomant. Ils peuvent aussi activer ou désactiver les couches cartographiques en lien avec les politiques spatiales. Ils peuvent interroger ces couches pour obtenir des informations descriptives (e.g. les résultats d'une consultation). Les utilisateurs lancent des discussions et débattent des problèmes et, dans un certain sens, créent ainsi leur propre base de données communautaire géoréférencée. Une nouvelle discussion peut être lancée en cliquant sur un emplacement approprié par exemple. Les utilisateurs peuvent rechercher des discussions sur la carte en fonction d'un sujet spécifique, d'un mot-clé ou cliquer sur les emplacements des points sur la carte pour afficher la discussion précédente et faire eux-mêmes des commentaires.

Depuis quelques années, la participation citoyenne à l'aide de la cartographie web a pris de nouvelles ampleurs. La cartographie 2D s'est dirigée vers des mondes plus immersifs en exploitant la 3<sup>e</sup> dimension spatiale (3D). Certains chercheurs ont développé des plateformes de participation citoyenne utilisant la 3D au sein d'une cartographie web pour représenter l'information spatiale. [15] ont développé un globe virtuel (GeoGlobe) en ligne pour fournir un environnement de partage de l'information de planification urbaine 3D distribué pour la participation citoyenne. Le globe virtuel a facilité la participation citoyenne en proposant des fonctionnalités similaires à Google Earth (zoom, survol panoramique, visualisation des projets de planification, activation de l'inspection des fonctionnalités). La plateforme peut être étendue pour soutenir la participation des citoyens en leur permettant d'échanger des commentaires et de publier des modèles 3D de bâtiments proposant des alternatives aux projets proposés. La représentation des bâtiments 3D est photo-réaliste. Les principales limites

de cette solution sont la lenteur de la transmission des fichiers CityGML<sup>1</sup>, structure sur laquelle s'appuie la plateforme, et le fait que le modèle 3D ne puisse pas être directement mis à jour.

L'utilisation des globes virtuels dans un contexte participatif a été poursuivie par [17]–[20]. Ils ont utilisé le globe virtuel Nasa World Wind<sup>2</sup> (NWW) et la version web Web World Wind (WWW). Ils ont aussi utilisé d'autres technologies web telles que Leaflet<sup>3</sup>, jQuery<sup>4</sup>, Bootstrap<sup>5</sup>, Cordova<sup>6</sup>, etc. À travers leurs travaux, ils ont réalisé une série de cas d'étude où des points d'intérêts (POIs) (i.e. lieux touristiques, propositions d'aménagement, parcs, lieux pour personnes à mobilité réduite, etc.) étaient représentés par des symboles ponctuels 2D et 3D. Des images illustrant le POI étaient également affichées lorsque le POI était cliqué. Les utilisateurs pouvaient contribuer à l'enrichissement de ces plateformes en donnant leur opinion au sujet des POIs, que ce soit au niveau de la planification urbaine ou des attraits touristiques. Les chercheurs ont conclu qu'une visualisation 3D avait permis aux citoyens de bénéficier de détails réalistes (e.g. topographie avec imagerie satellite) ce qui les a aidés à mieux comprendre l'aspect du territoire.

[21] ont proposé un SIG 3D collaboratif multi-étapes en ligne pour soutenir la participation citoyenne. La plateforme développée permet des réunions en ligne synchrones dans lesquelles les décideurs et les participants publics peuvent collaborer, concevoir des solutions alternatives et effectuer des évaluations. Ce SIG 3D s'appuie sur Skyline Globe<sup>7</sup> qui nécessite

---

<sup>1</sup> CityGML : CityGML est un format de données ouvert standardisé et un format d'échange pour stocker des modèles 3D numériques de villes et de paysages. Il est implémenté en tant que schéma d'application pour GML3, et il s'agit d'une norme internationale officielle de l'OGC (<https://www.citygml.org/>).

<sup>2</sup> Nasa World Wind : Est un globe virtuel développé par la Nasa (<https://worldwind.arc.nasa.gov/>).

<sup>3</sup> Leaflet : Est une librairie frontale pour le développer de cartographies web 2D (<https://leafletjs.com/>).

<sup>4</sup> JQuery : Est une librairie frontale développée sur JavaScript rendant plus simple la programmation web (<https://jquery.com/>).

<sup>5</sup> Bootstrap : Est une librairie frontale offrant des fonctionnalités pour bâtir des interfaces responsives (<https://getbootstrap.com/>).

<sup>6</sup> Cordova : Est un programme permettant de convertir des applications web en applications natives (<https://cordova.apache.org/>).

<sup>7</sup> Skyline Globe : Est un globe virtuel payant pour la diffusion et la visualisation de données multidimensionnelles (<http://www.skylineglobe.com>).

une licence pour pouvoir être utilisé. Les éléments représentés à travers la plateforme cartographique sont principalement des bâtiments et d'autres objets urbains tels que des lampadaires, des arbres, etc. Il y a aussi de l'imagerie satellitaire photo-réaliste. Les bâtiments sont également représentés de manière photo-réaliste. Les auteurs ont évalué leur plateforme au moyen d'un questionnaire papier. Les participants ont rempli le questionnaire à la suite de leur expérience avec la plateforme. Le questionnaire visait à évaluer les concepts mis en œuvre dans la plateforme. Les résultats obtenus ont montré qu'une vue 3D facilite la compréhension des aménagements proposés au sein de la ville, améliorant ainsi la compréhension des participants concernant le contexte spatial. En outre, la plupart des participants ont convenu qu'une telle plateforme peut favoriser la participation citoyenne. Les résultats de cette recherche ont également souligné que les modèles 3D doivent représenter autant que possible la réalité. Dans l'ensemble, les participants ont indiqué que les outils de visualisation 3D, de géoréférencement et de messagerie instantanée constituaient des atouts importants pour leur participation. En plus de devoir utiliser une technologie payante, la limite principale de cette étude concernait la capacité de travailler hors ligne.

Enfin, [16] ont développé une plateforme de participation publique 3D basée sur la scène virtuelle X3DOM<sup>8</sup>. La plateforme est une application web qui peut être utilisée pour présenter des plans de politique urbaine au public et engager les parties prenantes à un stade précoce du processus de planification. Les éléments principaux présentés dans cette plateforme sont des bâtiments 3D. Les modèles sont photo-réalistes, mais sans texture. À cet effet, ils ont noté que si l'objet de la consultation concerne, par exemple, l'aménagement de nouveaux bâtiments, le modèle 3D doit être le plus réaliste possible pour être à la fois compréhensible et convaincant. Les auteurs ont identifié trois facteurs principaux pour développer des cas d'utilisation réussis de planification urbaine basée sur le web: la qualité des données, l'accessibilité et la portabilité. En ce qui concerne la qualité des données, cela signifie que les modèles doivent être aussi proches de la réalité que possible (par exemple les bâtiments 3D), sinon l'acceptation sera

---

<sup>8</sup> X3DOM: Est une scène virtuelle frontale permettant de créer des applications 3D sur le web (<https://www.x3dom.org/>).

faible. L'interface doit être facile à utiliser et conviviale. Enfin, l'application doit être basée sur le Web pour augmenter l'accessibilité. Il est à noter que des travaux similaires sur la 3D n'ont pas abouti aux mêmes conclusions quant au réalisme des modèles. Cette question va être abordée plus en détail dans la prochaine section.

## 1.2 Problématique

Bien que les plateformes cartographiques web 2D et/ou 3D identifiées au travers de la revue de l'existant offrent des fonctionnalités adéquates pour faciliter la participation citoyenne, il reste qu'elles ne répondent pas entièrement aux besoins identifiés (cf. Introduction – Mise en contexte) pour la renforcer. En ce sens, il y a deux aspects majeurs qui demeurent absents dans ces plateformes. Le premier aspect concerne la représentation des informations spatiales partagées au sein des consultations citoyennes. Le second aspect concerne la possibilité de visualiser avec transparence l'évolution et l'état de la ville dans le temps.

Pour ce qui est des représentations utilisées pour communiquer des informations spatiales partagées au sein des consultations citoyennes, elles ne sont pas toujours adaptées en matière d'intuitivité et d'accessibilité. En effet, elles ne sont pas toujours construites pour favoriser la communication de l'information au grand public. Il y a deux aspects identifiés qui amènent de la confusion dans la compréhension des informations : la dimension spatiale de représentation (2D vs 3D) et le niveau de réalisme et d'abstraction. Encore aujourd'hui, le débat persiste entre l'utilisation de la 2D ou de la 3D pour représenter l'information spatiale. Il y a plusieurs écoles de pensée sur ce sujet dans la littérature [22]. La question demeure actuelle et elle se pose d'autant plus lorsqu'il s'agit de communiquer l'information spatiale à des non-experts.

En ce qui concerne le niveau de réalisme, la revue des plateformes 3D web de participation citoyenne met en évidence, qu'une représentation hautement réaliste (photo-réaliste) favorise l'acceptation du public et leur compréhension vis-à-vis du phénomène observé. Néanmoins, il y a des études démontrant que les représentations réalistes donnent souvent l'impression aux citoyens que le projet est déjà terminé et que la consultation est cosmétique [23]. Comme le cite B. Mericskay dans sa thèse de doctorat : « Le réalisme ne doit pas être trop poussé au

risque de mauvaises interprétations de la part des citoyens » ([23], p. 286). De plus, les représentations réalistes peuvent causer des problèmes du point de vue technologique limitant l'accessibilité des citoyens. En effet, bien que les technologies (ex. cellulaires, ordinateurs, tablettes) soient de plus en plus performantes en matière de capacités machines (e.g. CPU, GPUs, mémoire, stockage), il reste que la majorité de la population ne détient pas d'appareils assez puissants pour rendre des modèles 3D hautement réalistes sur le web, tel que suggéré par les études récentes. C'est pourquoi les modèles photo-réalistes ne sont pas toujours appropriés en matière d'accessibilité aux citoyens.

À l'opposé, les représentations plus abstraites (i.e. non photo-réalistes) servent à améliorer la performance de la visualisation en simplifiant le rendu des éléments visualisés. En ce sens, elles servent à diminuer la complexité visuelle de la visualisation et à augmenter l'accent de l'utilisateur sur des éléments d'intérêts [24]. De plus, ce ne sont pas toutes les informations spatiales partagées au sein d'une consultation citoyenne qui peuvent être représentées de manière photo-réaliste. Comme le mentionnent [25], certains phénomènes ne sont pas faits pour être vus dans la réalité (ex. densité de population, indice de surface verte), par conséquent il est impossible pour ces derniers d'apparaître réalistes. L'utilisation de représentations abstraites apporte néanmoins des défis du point de vue visuel, car une abstraction trop importante des informations peut apporter de la confusion chez les citoyens. Ainsi, un des défis majeurs concerne l'adaptation de la visualisation de représentations abstraites pour favoriser la compréhension par des non-experts. La visualisation dans un processus de participation citoyenne étant l'élément central d'une communication efficace, il est important que les participants comprennent rapidement et sans ambiguïté ce qui est montré [26].

Si l'on s'intéresse maintenant au second élément absent des plateformes cartographiques actuelles exploitées dans le cadre de processus de participation citoyenne (i.e. visualiser avec transparence l'évolution et l'état de la ville dans le temps), les citoyens ne disposent d'aucun moyen pour évaluer l'impact des choix proposés lors d'une consultation sur la transformation du paysage urbain. Si de tels moyens étaient mis à leur disposition dans les plateformes cartographiques, ils pourraient formuler une opinion ou faire un choix plus éclairé. Aux meilleures de nos connaissances, cette capacité de simulation dans l'espace-temps des choix



possibles et d'analyse des impacts de tels choix n'est pas offerte dans les plateformes cartographiques web de participation citoyenne actuelles.

Les points soulevés à travers la revue des plateformes cartographiques web de participation citoyenne nous amènent donc à poser le problème suivant :

*« Comment concevoir et développer une plateforme cartographique web permettant de visualiser et comprendre, de manière intuitive, les informations partagées au sein d'une consultation citoyenne ainsi que les impacts des choix réalisés. »*

### **1.3 Hypothèse**

Dans le but de formuler adéquatement l'hypothèse de ce projet de recherche, nous visons à étudier les pistes de solution permettant de 1) représenter intuitivement les informations spatiales partagées au sein d'une consultation citoyenne et 2) d'explicitier intuitivement l'impact des choix réalisés lors des consultations. Les paragraphes suivants vont détailler les pistes de solution retenues. Celles-ci ont été déterminées après avoir réalisé une revue dans le domaine de la géomatique, la géographie et des systèmes d'information en générale.

Tout d'abord, la cartographie Web fait partie des outils de géovisualisation destinée à rendre visibles des phénomènes spatiaux à l'aide de représentations visuelles concrètes et de capacités visuelles humaines [27]. Elle intègre principalement trois composantes : spatiale, temporelle et sémantique [26]. La composante spatiale procure une manière intuitive de représenter des phénomènes dans l'espace, en permettant entre autres, leur géolocalisation. La composante spatiale fait souvent référence à deux modes de représentation : la 2D et la 3D. La visualisation 2D en géomatique fait référence à la cartographie et celle-ci possède deux coordonnées (ex. longitude et latitude). Une des forces (étant à la fois une faiblesse) de la cartographie 2D est qu'elle procure une simplification de la réalité [28]. Quant à la représentation 3D, celle-ci devient pleinement significative lorsque la représentation du phénomène observé correspond au modèle mental de l'utilisateur [29], par exemple représenter un bâtiment par un modèle 3D. Dans ce cas, la représentation 3D est la plus intuitive et la plus expressive pour visualiser, représenter et communiquer l'information spatiale [30], [31], [32]. La représentation 3D est

aussi particulièrement efficace pour communiquer des plans, des designs pour la participation citoyenne et d'autres processus qui impliquent des non-experts [30]. L'utilisation de la 3D est néanmoins difficile, car elle exige de traiter l'occlusion, le niveau de réalisme (aussi niveau de détail (LOD)) et d'abstraction, en fonction des capacités graphiques de l'ordinateur, pour ne nommer que quelques-unes des difficultés [24]. Les problèmes d'occlusion peuvent être résolus avec la transparence et des techniques de positionnement [33], alors que les progrès récents avec WebGL<sup>9</sup> offrent des moyens prometteurs pour gérer les capacités graphiques de l'ordinateur [28]. En ce qui concerne le niveau de réaliste et d'abstraction, les chercheurs ont généralement convenu que les choix finaux allaient se faire en fonction du contexte, du but de la visualisation et du public visé [24].

La question d'utiliser ou non la 3D dans le monde de la visualisation est controversée et grandement discutée à travers la communauté scientifique. Certains chercheurs soutiennent que deux dimensions sont suffisantes pour une analyse efficace des données [22]. Dans leur pensée, la troisième dimension implique des difficultés inutiles telles que l'occlusion et la perte d'informations sur les faces non visibles depuis le champ de vision. Une autre école de pensée voit la troisième dimension comme une possibilité d'encoder davantage d'informations [22]. Néanmoins, selon [25] le choix entre 2D et 3D en matière de représentation spatiale dépend de plusieurs aspects (e.g. la complexité des données, la technologie d'affichage, la tâche et le contexte d'application) et il est difficile de choisir entre 2D et 3D. Plusieurs travaux soutiennent que les dimensions 2D et 3D sont complémentaires [22]. [34] et [35] pensent aussi qu'une combinaison 2D et 3D est meilleure que chacune prise séparément et offre des performances supérieures dans la résolution de problème.

La combinaison de la composante spatiale avec la composante temporelle est la composante spatiotemporelle [30]. Celle-ci fait souvent référence aux cartographies dynamiques. Le terme employé pour représenter des données 3D évoluant dans le temps est la quatrième dimension (4D) [28]. La composante spatiotemporelle apporte de l'information nouvelle, à savoir

---

<sup>9</sup> WebGL : Librairie graphique basée sur OpenGL et HTML5, <https://www.khronos.org/webgl/>

comment les phénomènes vont évoluer dans l'espace et dans le temps. La composante spatiotemporelle permet d'apporter cette compréhension. Il est souvent ardu de savoir quelle dimension spatiale (2D, 3D) est la plus adaptée pour représenter des phénomènes spatiotemporels. Dans leur étude [35], revendiquent que les représentations 2D ne sont pas significativement meilleures que les représentations 3D pour analyser des données spatiotemporelles.

Sachant que : 1) La cartographie web facilite l'accessibilité et encourage la participation citoyenne; 2) Dans un contexte spatial, les dimensions 2D et 3D sont complémentaires dans le sens où une combinaison tire avantage des forces de chacune ; 3) Dans un contexte temporel, la représentation 2D n'est pas significativement meilleure que la 3D pour communiquer l'information ; 4) Les simulations spatiotemporelles peuvent apporter au citoyen une meilleure compréhension de l'évolution de sa ville dans le temps et les choix réalisés lors de consultations; nous posons l'hypothèse de recherche suivante :

*« Combiner adéquatement les dimensions 2D, 3D et temps au sein d'une plateforme cartographique web de participation citoyenne permet de représenter de manière intuitive les informations relatives à la consultation et offre une meilleure compréhension des impacts des choix réalisés ».*

## **1.4 Objectifs**

### **1.4.1 Objectif principal**

L'objectif général de recherche suivant devra être atteint afin de valider notre hypothèse :

*« Concevoir et développer une plateforme cartographique web de participation citoyenne combinant des visualisations multidimensionnelles (2D, 3D, temps) de manière intuitive, afin que les citoyens puissent mieux évaluer et comprendre les enjeux de la consultation. »*

## 1.4.2 Sous-objectifs

Le premier sous-objectif vise à étudier les approches de représentation 2D/3D des informations spatiales partagées au sein d'une consultation citoyenne pour aboutir à des directives de représentation adaptées à la consultation elle-même.

Le deuxième sous-objectif consiste à concevoir un mécanisme de simulation spatiotemporelle 2D/3D adapté à une consultation citoyenne.

Le troisième sous-objectif consiste à valider les propositions conceptuelles proposées aux sous-objectifs 1 et 2.

La résolution des sous-objectifs conduit à l'atteinte de l'objectif principal et par conséquent à la validation de l'hypothèse. La finalité de notre recherche est de favoriser et renforcer la participation citoyenne au sein des villes.

## 1.5 Méthodologie

Les grandes étapes de la méthodologie établies pour l'atteinte des sous-objectifs et par conséquent de l'objectif principal de recherche sont présentées au travers des points suivants (cf. Figure 1) :

Sous-objectif #1 : Étude des représentations 2D/3D, sélection d'une technologie 3D frontale et conception de directives de représentation 2D/3D pour la participation citoyenne :

- **Étape 1** : Cette première étape a concerné la collecte d'informations nécessaires pour définir des spécifications de représentation des informations partagées au sein d'une consultation citoyenne. Une revue de littérature recensant les approches de représentation spatiales 2D et 3D a été réalisée à cet effet.
- **Étape 2** : À cette étape, nous avons identifié les critères de sélection à appliquer pour ne retenir, parmi les approches recensées, que celles qui étaient les plus adaptées au contexte de la participation citoyenne et à la finalité de cette recherche.

- **Étape 3** : Cette troisième étape a consisté en une analyse par critère visant à confronter les approches recensées à l'étape 1 aux critères établis à l'étape 2. Elle a permis d'énoncer des directives afin de sélectionner l'approche de représentation cartographique la mieux adaptée pour chaque type d'information partagée au sein d'une consultation citoyenne.
- **Étape 4** : Cette étape a consisté à passer en revue les technologies géospatiales (i.e. cartographies web, globes virtuels et scènes virtuelles) web de rendu 2D et 3D pouvant répondre aux exigences de cette recherche. Une préférence a été donnée aux technologies open source gérant la référence spatiale.
- **Étape 5** : À cette étape, nous avons réalisé une analyse comparative des technologies retenues lors de la revue de littérature. Les critères pris en compte dans l'analyse répondent aux exigences préliminaires de ce projet de recherche (cf. Introduction – Cadre opératoire) Les résultats de l'analyse ont permis de sélectionner la technologie géospatiale web de rendu 2D/3D qui a été implantée au sein de la plateforme.

Sous-objectif #2 : Conception d'un mécanisme de simulation spatiotemporelle pour la participation citoyenne :

- **Étape 6** : À cette étape, nous avons mené une étude sur les principales approches de représentation temporelle et sur les techniques d'analyse spatiotemporelle afin de mieux comprendre comment la dimension temporelle peut être représentée au sein de la plateforme cartographique Web. Cette étude visait également à comprendre comment l'évolution et la propagation d'un phénomène spatial au travers du temps peuvent être explicitées de manière intuitive dans de telles plateformes.
- **Étape 7** : La septième étape a porté sur la conception d'un mécanisme de simulation spatiotemporelle adapté à la consultation citoyenne. Le fondement de cette conception repose sur les conclusions tirées de l'étude réalisée à l'étape 6.

Sous-objectif #3 : Conception et développement d'un prototype de plateforme cartographique web pour la participation citoyenne :

- **Étapes 8 à 12** : Les étapes 8 à 12 de la méthodologie concernent le sous-objectif 3. Elles portent sur la conception de l'architecture logicielle du prototype de la plateforme

cartographique ciblée. Au travers de cette architecture, nous avons intégré les approches conceptuelles des étapes précédentes, à savoir les approches de représentation 2D/3D choisies ainsi que le mécanisme de simulation spatiotemporelle. Une fois l'architecture définie, nous avons construit le schéma des données et le diagramme UML du prototype. À partir de ces plans, nous avons procédé au développement du prototype. Une approche de développement agile a été sélectionnée pour découper le développement en itérations. Cela a permis d'évaluer et d'adapter le développement à chaque itération et de se rapprocher du résultat espéré à savoir un prototype répondant à la problématique de ce projet de recherche. Lorsque le prototype a été développé, la phase de validation (aussi appelé phase de tests) a débuté. Cette phase a été réalisée en deux parties : tests de performance (aussi appelés tests préliminaires) et tests utilisateurs. La phase des tests de performance est la dernière étape avant le déploiement final. Au travers de cette phase, nous avons réalisé des tests préliminaires avec un nombre restreint d'utilisateurs afin de révéler les points critiques (e.g. erreurs, bogues, performance des simulations et du rendu 3D) de la plateforme développée. À la suite de ces tests, nous avons procédé à une série de rectifications pour nous assurer que la plateforme était prête pour la phase des tests utilisateurs. L'échantillon choisi pour réaliser les tests utilisateurs n'était pas représentatif de la population. Par conséquent il ne permet pas la validation du prototype développé dans un contexte de participation citoyenne. Ceci constitue donc une limite importante de notre recherche. Néanmoins, les résultats issus des tests ont permis d'évaluer entre autres, si la plateforme et ses concepts offraient une meilleure compréhension de l'objet de la consultation et des impacts des choix réalisés.

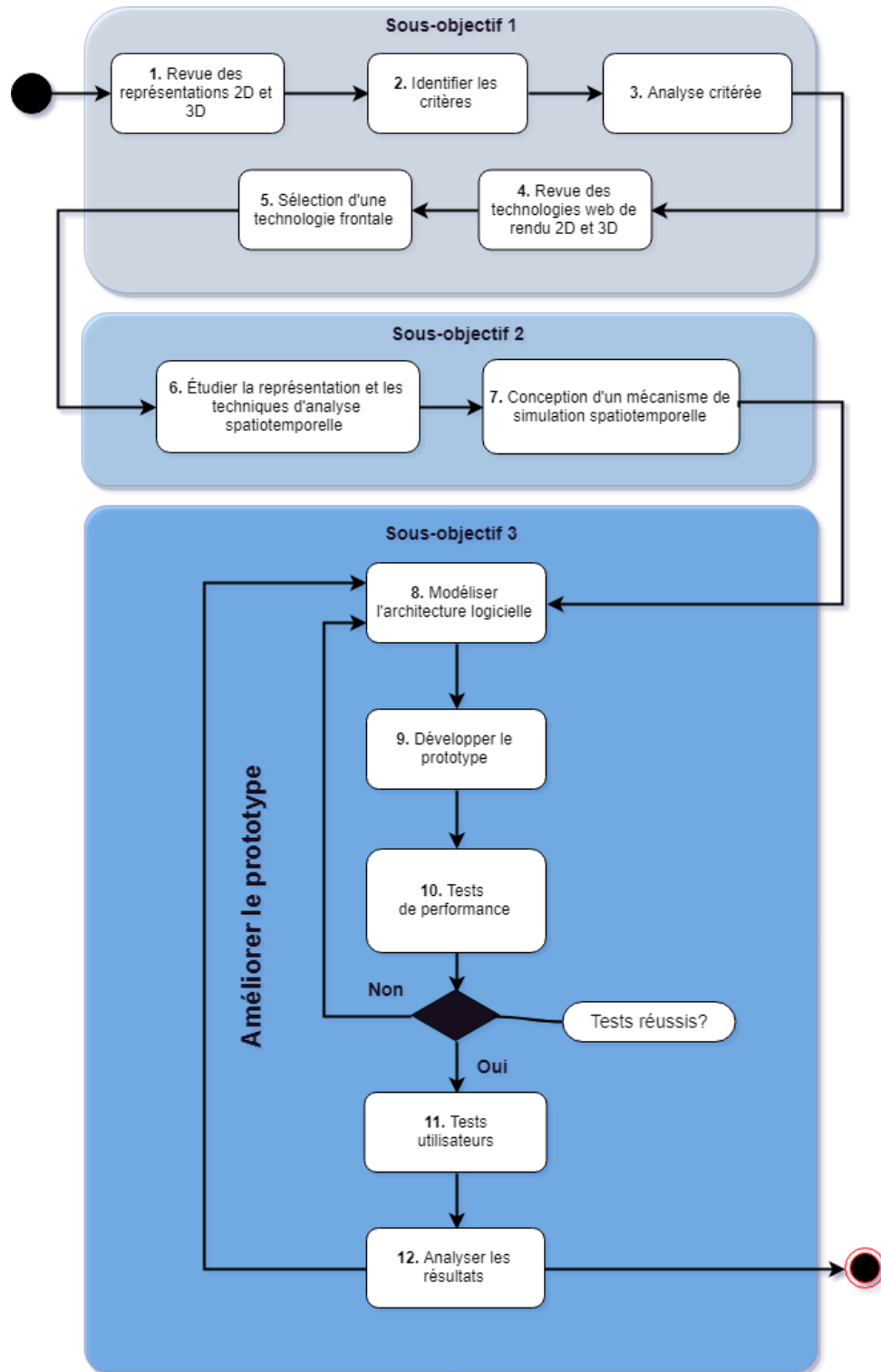


Figure 1 - Méthodologie proposée pour aboutir au développement d'une plateforme de cartographie web.

## 1.6 Cadre opératoire

À ce stade-ci du projet, certaines exigences préliminaires concernant les spécifications opérationnelles de la plateforme web doivent être établies étant donné qu'elles influencent certains des concepts et approches présentés dans les prochains chapitres.

Tout d'abord, la plateforme cartographique est destinée à être utilisée sur le web. Comme il existe peu de directives concernant le développement d'interfaces cartographiques web, notamment en matière de cartographies 3D/4D [28], la réalisation de la plateforme s'appuie sur des directives existantes dans le domaine du développement web. L'utilisabilité est un critère important à considérer lorsqu'on développe des applications web. La norme ISO 9241-11 définit l'utilisabilité comme un « *critère permettant à l'utilisateur d'accomplir une tâche avec efficacité, efficacité et satisfaction dans un contexte particulier* » (International Organization for Standardization, 2006). Google, par sa domination sur le web, a en quelque sorte établi des règles d'utilisabilité pour construire des interfaces cartographiques web. Google Maps et/ou Google Earth étant familiers du grand public, l'interface de la plateforme cartographique envisagée s'en inspire [28].

La plateforme cartographique web ciblée doit s'appuyer sur des normes préexistantes telles que l'OGC et l'ISO211 pour supporter la référence spatiale, plus spécifiquement WGS84 (EPSG : 4326) puisque celle-ci est la norme universelle, l'accès aux services web tels que WMS, WFS, WMTS, les images satellitaires, la topographie (i.e. MNT), les données vectorielles et matricielles ainsi que les dimensions 2D et 3D, par exemple le rendu de bâtiments 3D. De plus, la plateforme cartographique doit être en mesure de gérer le temps, de proposer une visualisation de l'évolution des phénomènes dans le temps. Il faut donc que la plateforme dispose de fonctionnalités intégrant ces dimensions cartographiques, de visualisation voir de simulation spatiotemporelle. La technologie retenue doit répondre à ces besoins.

Finalement, pour assurer une plus grande reproductivité de cette recherche, les technologies open source sont priorisées.



## **1.7 Structure du mémoire**

La suite du mémoire est structurée de la manière suivante. Le Chapitre 1 aborde la revue de littérature exhaustive visant à étudier et recenser 1) les approches de représentation 2D et 3D et 2) les technologies web de rendu 2D/3D. Sur la base de cette revue, des spécifications de représentation de l'information au sein d'une plateforme cartographique web destinée à la participation citoyenne seront définies. Le Chapitre 2 concerne la conception d'un mécanisme de simulation spatiotemporelle adaptée à la consultation citoyenne. Le Chapitre 3 porte sur la réalisation d'un prototype de plateforme cartographique pour la consultation citoyenne. Dans celui-ci, l'architecture logicielle et ses composantes sont présentées. Le Chapitre 4 présente et discute les résultats obtenus lors de l'évaluation du prototype par un groupe de participants. Finalement, la dernière partie concerne les principales conclusions tirées de cette recherche. On y retrouve une critique de l'étude, les contributions apportées, les travaux et les perspectives

# **Chapitre 1 – Directives de représentation 2D et 3D**

## **appliquées à la participation citoyenne**

*Ce chapitre vise en premier lieu à recenser les différentes approches de représentation 2D et 3D. Ces approches de représentation proviennent essentiellement de deux domaines scientifiques soit : le domaine de la vision par ordinateur et celui des cartographies numériques et web. À la suite de la revue effectuée, des approches de représentation ont été retenues basées sur leur pertinence vis-à-vis de la problématique de cette recherche puis elles ont été regroupées par catégorie de représentation. Les catégories de représentation sont construites en fonction de la dimension de représentation (e.g. 2D vs 3D) et des caractéristiques spatiales de l'approche (e.g. points vs ligne vs région). Une partie du chapitre est consacrée à la description de ces catégories de représentation. Pour évaluer l'intuitivité et l'accessibilité de ces catégories pour la participation citoyenne, elles ont été confrontées à des critères d'évaluation. Les résultats issus de l'analyse critériée sont discutés dans ce chapitre et des directives de représentation appliquées à la participation citoyenne sont aussi proposées. Ce chapitre vise en deuxième lieu à recenser et comparer les technologies web de rendu 2D et 3D répondant aux exigences de ce projet de recherche. Il se conclut avec la sélection d'une technologie web de rendu 2D/3D pour le développement de la plateforme visée.*

### **1.1 Revue des approches de représentation 2D et 3D en cartographie**

Une revue exhaustive des approches de représentation 2D et 3D a été effectuée. Plusieurs modes de représentation ont été couverts. Initialement, les recherches ont été concentrées sur les approches de représentation utilisées pour communiquer des phénomènes géospatiaux dans un contexte de participation citoyenne. Mais, étant donné le peu d'études portant sur ce domaine spécifique, les recherches ont été élargies aux approches de représentation 2D et 3D utilisées dans les domaines suivants : la vision par ordinateur, la cartographie numérique et les sciences géomatiques. Les représentations destinées à des ordinateurs personnels tout comme celles pour le web ont été investiguées. La revue de littérature a permis de recenser au total 63

articles répartis en trois grandes catégories : articles traitant de la représentation 2D (15); articles traitant de la représentation 3D (40); et articles traitant de la représentation 2D et 3D (8) (cf. Tableau 1). Les articles traitant de la représentation 2D et 3D ne combinent pas tous les deux dimensions à la fois, mais discutent des approches de représentation d’une part 2D et d’autre part 3D. Les bases de données associées aux éditeurs suivants ont été interrogées : « Taylor & Francis, Elsevier, IEEE, ACM Press, ISPRS Archives, Springer et ScienceDirect ». Les principales revues à partir desquelles ont été tirés les articles de cette revue de littérature sont : « Visual Computer; Visualization and Computer Graphics; Information Visualization; Journal of Photogrammetry and Remote Sensing; Scientific Visualization; The Cartographic Journal; Computer Graphics; Visual Computer; Geo-spatial Information Science; International Journal of Digital Earth et Cartography and Geographic Information Science ».

*Tableau 1 - Catégories d’articles traitant de la représentation 2D et 3D.*

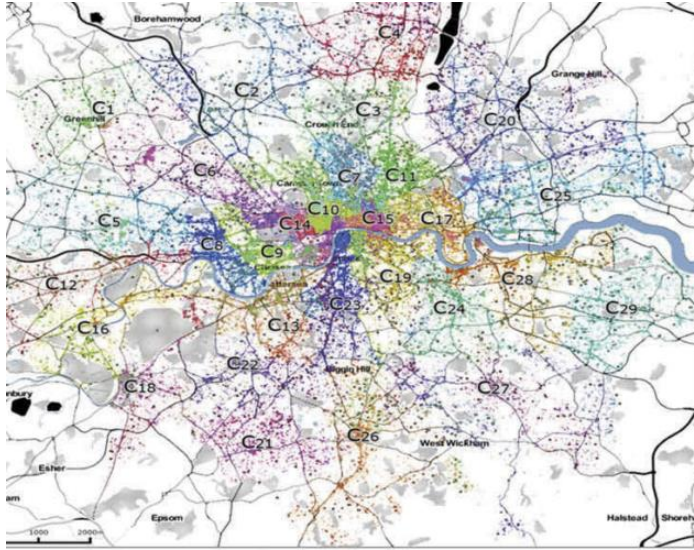
Thème	Nombre	Articles
<b>Représentation 2D</b>	15	[36], [37], [46]–[51], [38]–[45]
<b>Représentation 3D</b>	40	[15], [16], [52]–[61], [17], [62]–[71], [19], [72]–[81], [20], [82], [21], [24], [28], [30], [40]
<b>Représentation 2D et/ou 3D</b>	8	[17], [20], [25], [35], [59], [75], [83], [84]

### **1.1.1 Approches de représentation 2D**

Les approches de représentation 2D qui ont été retenues pour ce projet de recherche sont les représentations (1) discrètes, (2) par région et (3) linéaires. Ces approches de représentation reposent essentiellement sur des normes cartographiques connues et couramment utilisées pour représenter l'information spatiale sous forme abstraite. De telles approches de représentation peuvent représenter diverses informations spatiales inhérentes à une consultation citoyenne tels le tracé de routes, des quartiers urbains, des opinions partagées sur les réseaux sociaux, etc. Spécifions également qu'un inventaire détaillé des méthodes de représentation présentées dans cette section est disponible dans les ouvrages de Bertin (1987).

#### **1.1.1.1 Représentations discrètes**

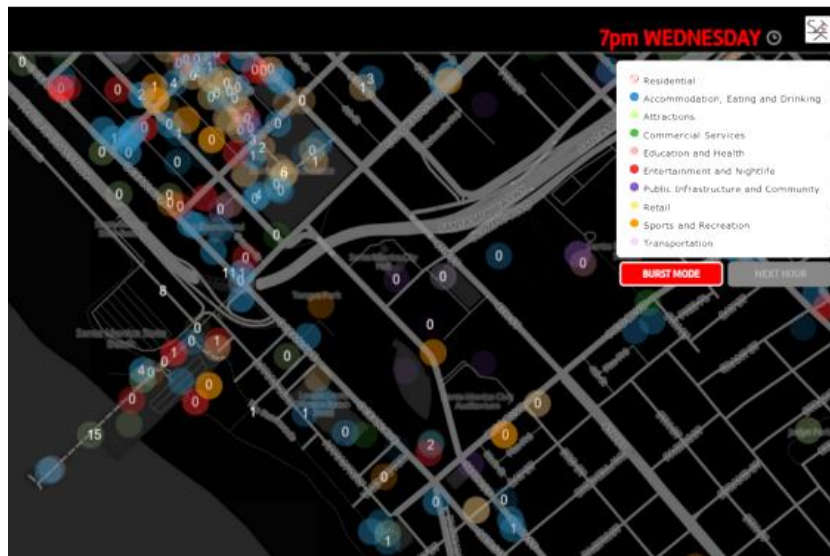
La représentation discrète sert à représenter des informations ponctuelles. Selon [85], c'est la façon la plus intuitive de visualiser des objets, des phénomènes, des événements géolocalisés (ex. se localiser lors d'une activité). Les informations cartographiées au moyen de cette représentation possèdent deux coordonnées spatiales (latitude et longitude) décrivant la position de l'objet dans l'espace géographique. Ces informations peuvent être représentées graphiquement par un point, un symbole ou du texte, auxquels sont associées les variables graphiques suivantes : l'intensité, la couleur, la taille et la forme. Celles-ci permettent d'encoder des caractéristiques propres à l'objet, au phénomène, à l'événement cartographié [85]. Par exemple, dans le cas de cartographie de tweets, ceux-ci peuvent être localisés géographiquement par un point, dont la couleur est représentative du sujet ou du thème abordé dans le tweet (cf. Figure 2). Néanmoins la représentation de données discrètes peut devenir complexe à visualiser lorsque le nombre d'objets ou d'événements augmente. Ainsi, la visualisation devient brouillonne et difficile à interpréter (cf. Figure 2).



*Figure 2 – Exemple d’une cartographie avec un nombre de points élevés (100 000 points et plus). Chaque point représente un tweet. Chaque tweet possède une couleur représentant une catégorie et un sujet récurrent identifié à partir de l’analyse de milliers de tweets, et ce sur une période de temps défini [86].*

Pour pallier au problème de surcharge d’information imposée par un nombre de points élevés, des techniques comme le regroupement de données ou l’interpolation peuvent être utilisées [87], [18], [88], [37],[75], [89], [85], [90]. Dans le cas du regroupement, les informations ponctuelles ayant des caractéristiques spatiales ou sémantiques similaires sont rassemblées au sein d’une seule et même représentation. La proximité est une caractéristique spatiale fréquemment utilisée selon laquelle les informations à une distance  $x$  les unes des autres sont regroupées. Les informations peuvent aussi être regroupées lorsqu’elles appartiennent à la même région (ex. regrouper les informations étant dans le même code postal). Le regroupement spatial est aussi utilisé pour agréger des données par niveau d’échelle [87]. Par exemple pour un point, une échelle petite (e.g. à l’échelle d’une ville) regroupe plus de points. À mesure que l’échelle augmente (e.g. passage d’une ville à un quartier), les points se séparent pour offrir un niveau de détail plus fin. Le regroupement par caractéristique sémantique consiste à regrouper des informations ayant des valeurs attributaires semblables (e.g. regroupement de tous les tweets relatifs au sport et à l’activité récréative). Dans ce sens, on peut facilement imaginer la thématique dominante à un niveau d’échelle plus petit, que ce soit

via une représentation par point, symbole [18]–[20], [91] ou texte [89]. La Figure 3 et la Figure 4 illustrent deux façons possibles de regrouper des données ponctuelles représentées par un point : inscrire le nombre d'éléments regroupés au sein du point ou ajuster la taille du point proportionnellement au nombre d'éléments. Ces techniques sont intéressantes pour rapidement repérer les points plus importants que les autres (e.g. les points contenant un nombre élevé d'éléments). Pour réduire le chevauchement généré par les informations ponctuelles, la transparence peut être utilisée (cf. Figure 3). Dans le cas de l'interpolation, celle-ci consiste à estimer les valeurs entre les points pour ainsi créer une « image » montrant les zones où la concentration de points est plus élevée (l'appellation « zones chaudes » est fréquemment utilisée dans le cas d'une interpolation par « hot spots ») et les zones où la concentration est moins élevée (l'appellation « zones froides » est fréquemment utilisée dans le cas d'une interpolation par « hot spots ») (cf. Figure 5).



*Figure 3 – Regroupement d'éléments spatiaux d'une même catégorie selon l'échelle spatiale; le chiffre dans le point sert à indiquer le nombre d'éléments regroupés [46].*

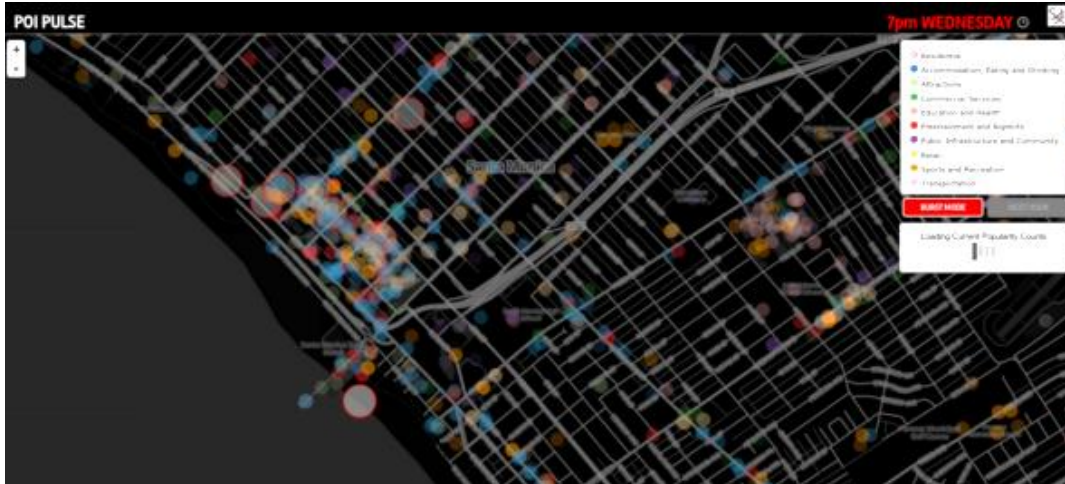


Figure 4 – Regroupement d’éléments spatiaux d’une même catégorie (représentés par une couleur) selon l’échelle spatiale; la taille du point s’ajuste proportionnellement en fonction du nombre d’éléments regroupés. Par exemple, une plus grosse taille signifie qu’il y a beaucoup d’éléments [46].

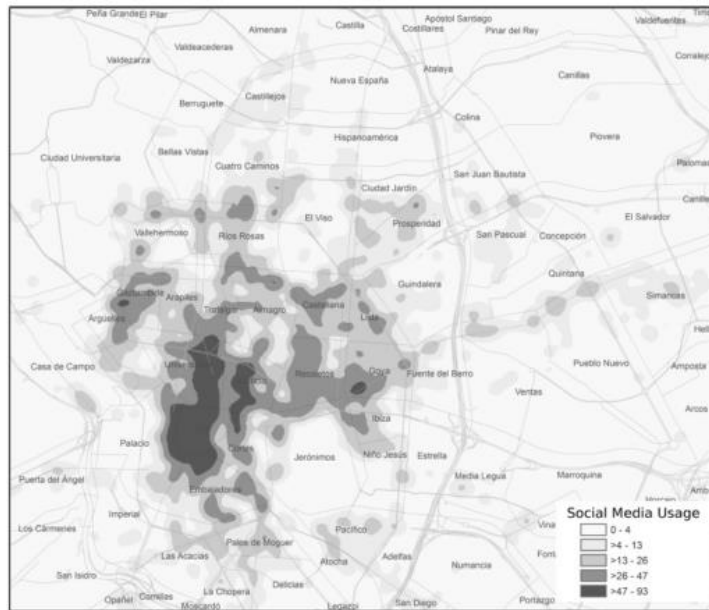
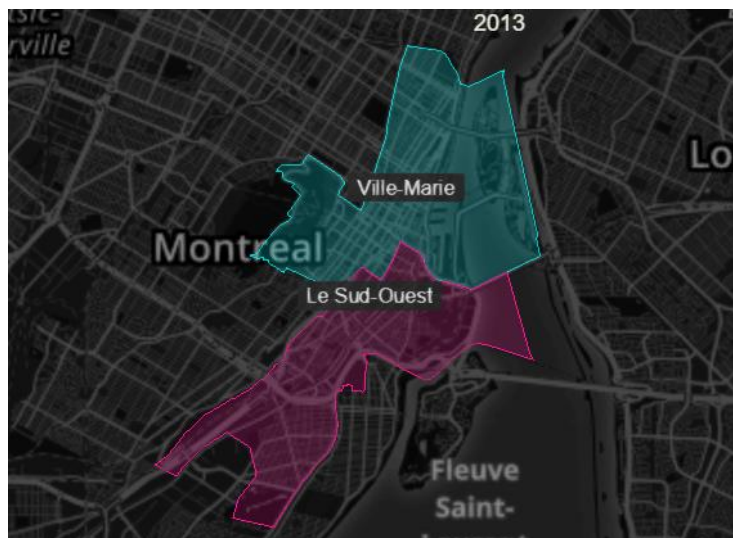


Figure 5 – Exemple d’utilisation d’une interpolation par « hot spot ». Dans cet exemple, les points chauds (plus foncés) représentent une forte activité liée à l’usage des médias sociaux à Tyrol, en Italie [75].

### 1.1.1.2 Représentations par régions

Les représentations par régions servent généralement à représenter de l'information associée à des divisions prédéterminées de l'espace [85]. Une approche populaire est la visualisation appelée *Chloropleth Map* qui consiste à représenter des données par zones (e.g. code postal ou arrondissement) et à attribuer une couleur aux régions en fonction de valeurs attributaires propres à la région (cf. Figure 6) [85]. En général, les visualisations basées sur les régions permettent de révéler des phénomènes macros (e.g. le code postal ayant la plus grande population). Néanmoins, elles sont inadéquates pour analyser des phénomènes micros (e.g. le comportement individuel d'un objet) [83].

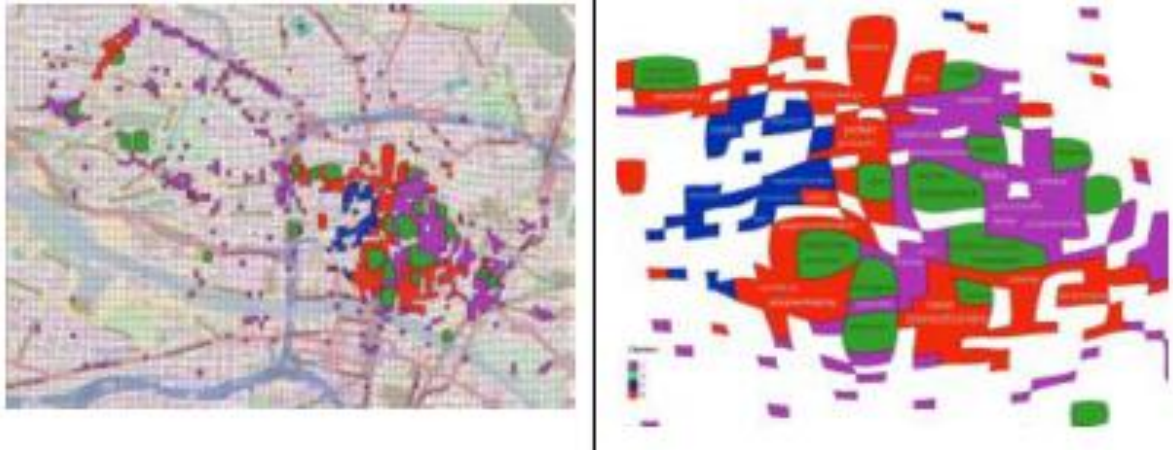


*Figure 6 – Exemple de représentation sous forme de régions. Les zones rouge et bleu représentent respectivement une insatisfaction à l'égard des services offerts par la Ville.*

Les variables graphiques telles que la couleur et l'intensité sont les plus observées dans les approches de représentation par régions. La couleur est utilisée pour illustrer différentes catégories ou thématiques. L'intensité est utilisée pour montrer les régions plus ou moins importantes que les autres. Il existe une autre approche que les variables graphiques pour montrer l'importance d'un phénomène. Il s'agit du changement de taille via une distorsion (cf. Figure 7). La distorsion peut être utilisée sur des phénomènes zonaux ne pouvant pas s'étendre en dehors de leur délimitation. Par exemple, la délimitation d'une province comme le Québec.



Cette délimitation ne changera pas dans le temps. L'utilisation de la distorsion peut alors être utilisée en mettant l'accent sur les régions où le phénomène est le plus important [92].



*Figure 7 – Exemple d’application d’une taille différente pour une représentation par régions. La distorsion est plus importante dans les régions où le phénomène est plus important. La figure de gauche présente le nombre de tweets par cellule et les couleurs représentent des catégories de discussion relatives à des réseaux sociaux. La figure de droite présente des régions avec plus ou moins de distorsion en fonction du nombre de tweets par cellule. Une description plus détaillée est donnée dans les études de [92].*

Il existe d’autres méthodes de représentation par régions, mais l’essentiel pour ce travail de recherche a été couvert.

### **1.1.1.3 Représentations linéaires**

Dans un contexte urbain, les représentations linéaires font souvent référence à des déplacements, à la circulation, aux réseaux routiers et à des trajectoires [83], [85]. Les trajectoires permettent de transformer des données discrètes comme des points, en des données continues [85], [90]. Cette transformation peut en dire davantage sur ce qui se produit au niveau sémantique dans l’espace. L’inverse peut aussi se faire, par exemple utiliser les trajectoires pour identifier des positions ponctuelles. Généralement, on peut dessiner des trajectoires en reliant deux points, soit par une courbe [93], une ligne [36] ou une flèche [88]. D’une part, la couleur est souvent utilisée pour représenter différents états et/ou catégories

associés à ce tracé, par exemple une couleur rouge pour une circulation congestionnée et verte pour une circulation fluide (cf. Figure 8). D'autre part, l'épaisseur et l'intensité du tracé du tracé sont souvent utilisées pour signaler le degré d'importance de l'information associée à la représentation linéaire proposée (cf. Figure 9). Les trajectoires espace-temps sont souvent utilisées pour représenter le phénomène de mobilité humaine. Le type de cartographie pour visualiser des trajectoires espace-temps est la *flow map* [90]. Lorsque la *flow map* est utilisée pour représenter les mouvements d'un objet dans le temps, c'est la position qui change et non une valeur sémantique.

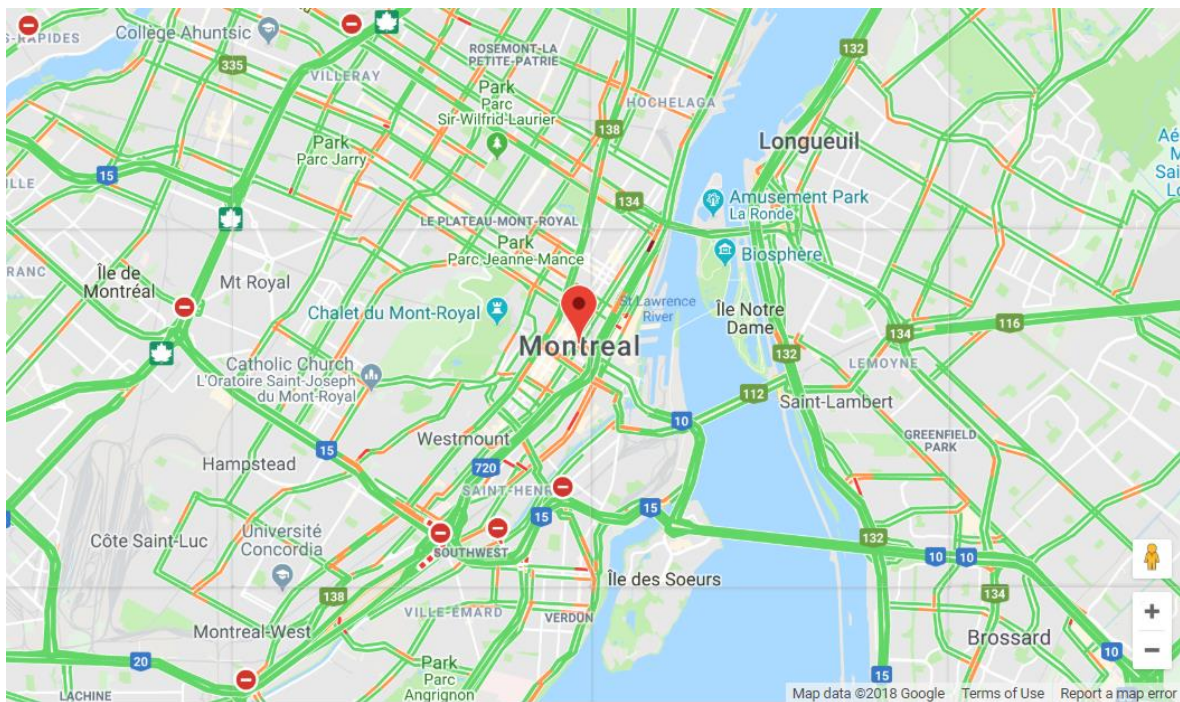


Figure 8 – Exemple d'une cartographie de l'état de la circulation à Montréal. Une couleur verte signifie que la circulation est fluide, à l'inverse une couleur rouge signifie que la circulation est congestionnée (Google Maps, 2018).



*Figure 9 – Exemple d’une flow map qui montre le nombre de déplacements durant sept jours (29 janvier au 5 février 2014) de Los Angeles à d’autres endroits en Amérique du Nord. Une trajectoire plus épaisse montre que cet itinéraire fut plus populaire pendant cette période [88].*

D’autres méthodes basées sur les lignes cherchent également à représenter un phénomène dans sa forme la plus naturelle possible, par exemple, pour représenter un écoulement ou des données bathymétriques (cf. Figure 10) comme dans [28].

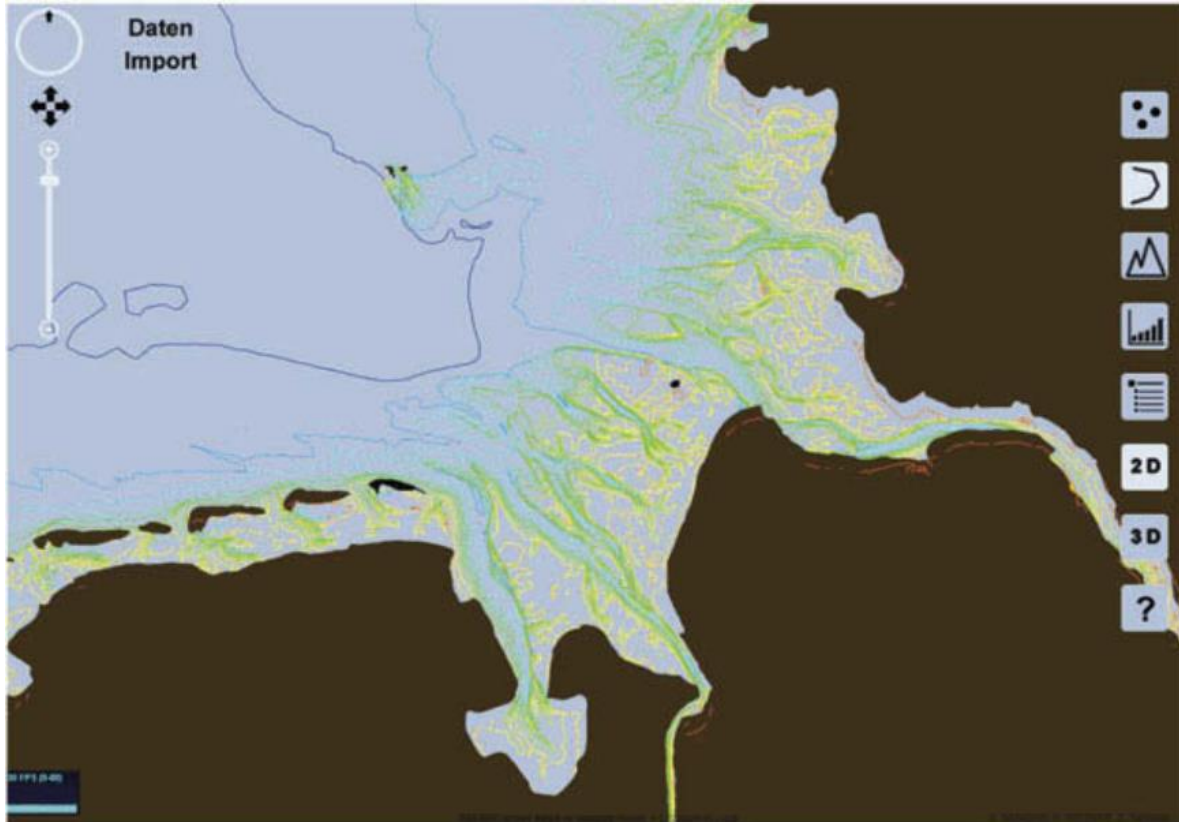


Figure 10 – Représentation 2D de données bathymétriques : les lignes de couleur représentent des courbes de niveau associées à l'élévation d'un niveau d'eau [28].

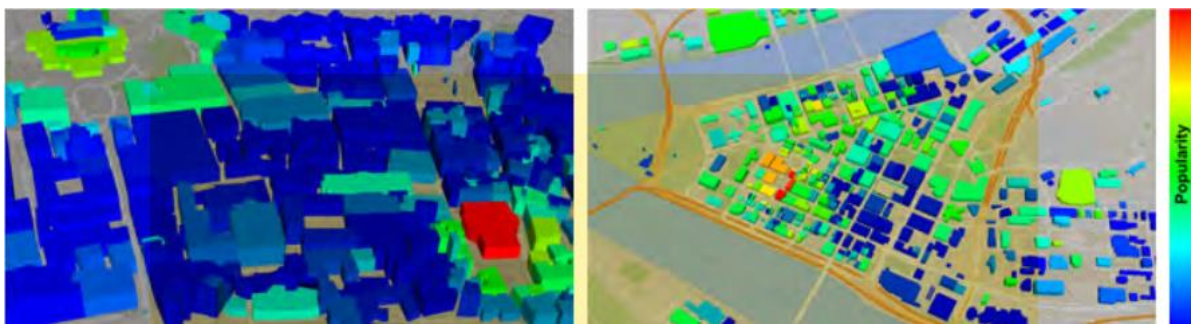
## 1.1.2 Approches de représentation 3D

Les approches de représentation 3D retenues pour ce projet de recherche sont (1) les approches basées sur des modèles 3D urbains; (2) les approches basées sur des modèles 3D naturels; (3) les approches de représentation discrète; (4) les approches de représentation linéaires; (5) les approches de représentation par régions. Un inventaire complet des approches 3D est également présenté dans les ouvrages de Bertin (1987).

### 1.1.2.1 Approches basées sur des modèles 3D urbains

Le terme modèle 3D urbains est employé lorsque les bâtiments sont utilisés pour encoder des informations cartographiques. Dans ce cas, les variables graphiques utilisées sont principalement la couleur [9], [69], [61], l'intensité et l'éclairage[55]. Cette méthode s'inspire

de l'approche équivalente en représentation 2D. En effet, les empreintes des bâtiments 2D sont souvent utilisées en cartographie pour montrer des phénomènes urbains liés aux bâtiments. Dans le cas de la présente représentation 3D, c'est la forme naturelle des bâtiments 3D qui est utilisée. Dans leur étude, [55] ont employé cette approche pour visualiser les endroits les plus populaires d'une ville en analysant les opinions des personnes consultées (cf. Figure 11). Ils ont encodé une couleur dans les bâtiments (rouge étant les plus populaires et bleu les moins populaires). Ils ont utilisé également une autre approche basée sur l'éclairage des endroits les plus populaires (cf. Figure 12).

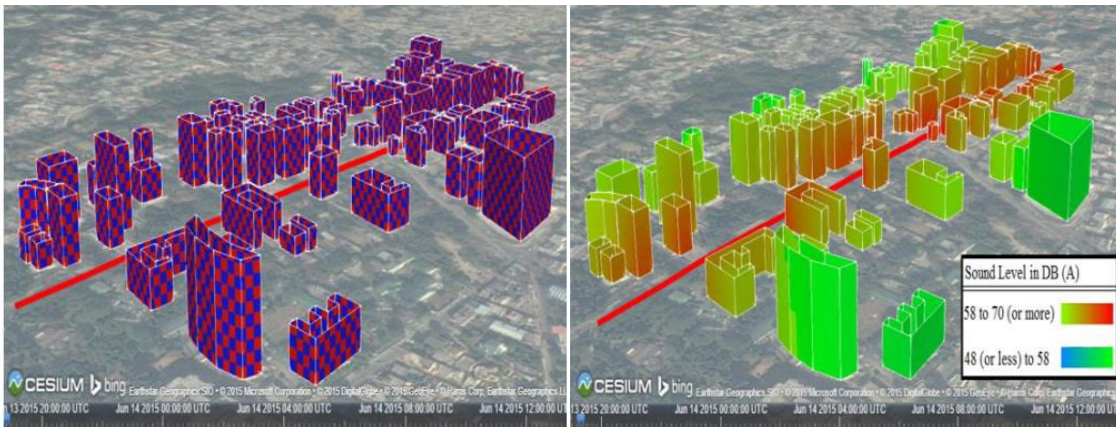


*Figure 11 – Cette figure illustre la popularité des quartiers basée sur l'analyse d'opinions extraites depuis les réseaux sociaux. Les valeurs de popularité sont normalisées pour chaque zone (la couleur rouge indique une forte popularité tandis qu'une couleur bleue indique l'inverse) [55].*



*Figure 12 – Représentation de la popularité des quartiers basée sur l'éclairage en utilisant la méthode visual lightning. À gauche, une vue sur le collège Trinity College à Dublin. À droite, le collège reçoit un niveau d'éclairage représentatif de sa popularité extraite à partir d'images géolocalisées publiées sur les réseaux sociaux [55].*

Dans les approches précédentes, l'encodage de la couleur est appliqué à l'ensemble du bâtiment. Néanmoins, lorsqu'il est nécessaire d'encoder une couleur pour différentes sections d'un bâtiment, il existe une approche basée sur l'utilisation de voxels<sup>10</sup>. Ce genre de situation peut être utile pour représenter des phénomènes de propagation tels que le son. C'est ce qu'ont fait [67] dans leur étude. Ils ont utilisé différentes approches pour visualiser le bruit issu de la circulation routière et son impact sur les bâtiments avoisinants. Ainsi, ils ont séparé l'intérieur des bâtiments en voxels (cf. Figure 13). Ensuite, en calculant la distance euclidienne 3D de la route jusqu'aux voxels, ils ont calculé l'intensité du bruit et représenté cette intensité par une couleur (cf. Figure 13).



*Figure 13 – À gauche, les bâtiments découpés suivant des voxels. À droite, une couleur a été associée à ces voxels pour montrer l'intensité du bruit causé par la circulation routière. Une couleur rouge correspond à un fort bruit alors qu'une couleur bleue correspond à un faible bruit [67].*

Les limites observées avec l'approche basée sur les modèles urbains concernent les mêmes limites que celles engendrées par la 3D, i.e. l'occlusion et la perte d'information sur les faces arrière des bâtiments [34]. Ces limites peuvent être réduites avec l'utilisation de la transparence, des techniques de navigation (pan, zoom, rotation) et par une combinaison des

---

<sup>10</sup> Voxel : Un voxel est un pixel 3D (cube).

visualisations 2D et 3D [35], [94]. En effet, la 2D bénéficie d'une vue d'ensemble et n'engendre pas d'occlusion.

### **1.1.2.2 Approches basées sur des modèles 3D naturels**

Les modèles 3D naturels font référence à la représentation d'un objet 3D dans sa forme la plus « naturelle » possible. Par exemple, la représentation d'un éclair [54], d'un bâtiment [21], [62], [64], d'un arbre [21], [69], [72], et ainsi de suite se fera au moyen d'un modèle 3D de forme équivalente à celle de l'objet ou du phénomène concerné. Cette représentation requiert moins d'effort cognitif puisqu'elle interpelle le modèle mental de l'utilisateur associé au phénomène ou à l'objet [29]. Ceci sort un peu des conventions cartographiques standards, notamment celles mises en place par Bertin (1983) où l'information est représentée à l'aide des variables graphiques et par conséquent de manière abstraite, comme, par exemple représenter des bornes-fontaines par des sphères. Les modèles 3D naturels sont souvent utilisés dans le domaine du jeu vidéo et de plus en plus en cartographie 3D.

Dans le contexte de ces représentations, différents niveaux d'abstraction et de réalisme du modèle peuvent être utilisés selon le but de la visualisation. La Figure 14 propose une illustration de différents niveaux de réalisme du modèle. La Figure 15 propose différents niveaux d'abstraction pour représenter les éclairs, soit, dans un cas, avec des lignes droites correspondant à un niveau d'abstraction plus élevé, soit, dans un autre cas, avec une ligne zébrée correspondant à un niveau moins élevé (i.e. moins abstrait).



Figure 14 – À gauche un niveau de réalisme élevé et à droite un niveau de réalisme faible (niveau d'abstraction plus élevé) d'une ville [24].

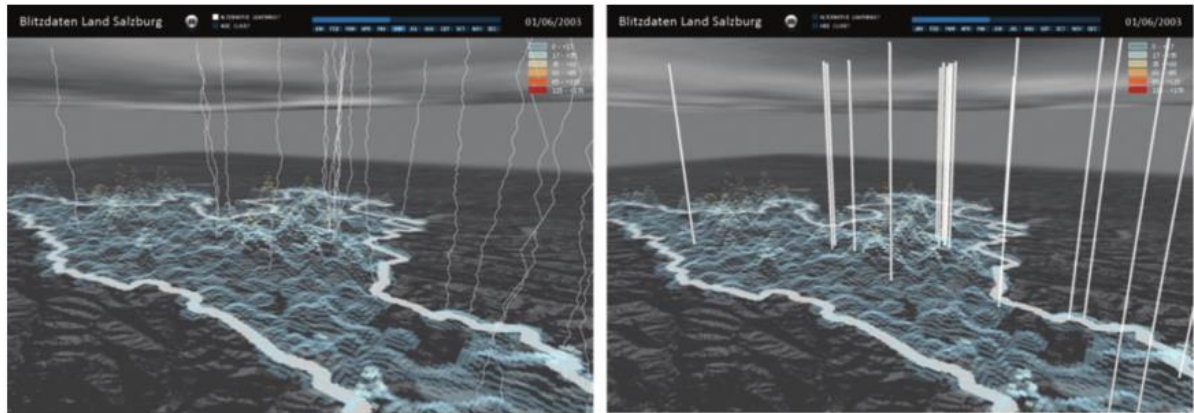


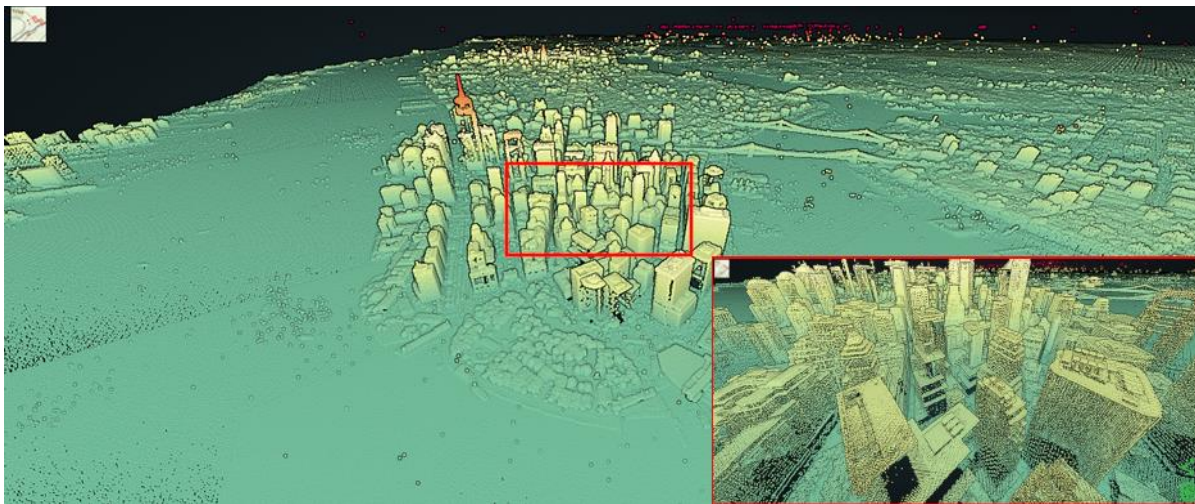
Figure 15 – Ces deux images illustrent deux façons utilisées par [54] pour représenter des éclairs, à gauche une façon photo-réaliste et à droite avec des lignes directes.

### 1.1.2.3 Approches de représentation discrètes 3D

Il y a trois types de représentations discrètes 3D fréquemment observées dans la littérature. La première est le nuage de points où des objets sont représentés par un ensemble de points possédant trois coordonnées spatiales (e.g. latitude, longitude, altitude). Des capteurs actifs tels que le LiDAR sont souvent utilisés pour acquérir des nuages de points sur l'occupation du sol. Le nuage de points peut aussi encoder une dimension supplémentaire associée à une caractéristique sémantique telle que la classe d'objets auquel appartient le point. La couleur ou l'intensité sont les variables graphiques utilisées dans ce cas. La classe d'objets à laquelle



appartient le point peut faire référence à diverses informations telles que l'occupation du sol (e.g. végétation par opposition aux bâtiments), ou encore l'altitude du point (cf. Figure 16). Similairement, la deuxième représentation fréquemment rencontrée est le POI 3D. La densification du POI 3D n'est pas la même que le nuage de points et il n'est surtout pas utilisé aux mêmes fins. En fait, tout comme le POI 2D, le POI 3D indique l'emplacement d'un objet, d'un lieu ou d'un événement possédant trois coordonnées spatiales [19]. Cette représentation peut aussi encoder une dimension sémantique supplémentaire grâce à la couleur, l'intensité, le symbole, le texte et la forme (e.g. une sphère). La troisième représentation est plus abstraite que les deux autres, car elle sert à représenter des phénomènes spatiaux possédant deux coordonnées spatiales et une coordonnée sémantique. La dimension sémantique peut faire référence à une valeur attributive (ex. nombre de signaux téléphoniques) et celle-ci est souvent représentée sur l'axe des Z (cf. Figure 17). Les représentations discrètes 3D souffrent aussi des lacunes de la 3D c'est-à-dire l'occlusion entre les points. Par conséquent, l'usage de la transparence est conseillé [34], [94]. Lorsque le nombre de points augmente, des techniques de regroupement peuvent être utilisées telles que l'approche par densité de Kernel 3D comme dans [95] où les points sont regroupés et interpolés par des voxels [94].



*Figure 16 – Nuage de points « point cloud » acquis avec un capteur LiDAR. Le nuage de point a été normalisé et classifié, la couleur indique à quelle classe d'altitude le point*

appartient. La figure encadrée en rouge au bas à droite de la figure principale correspond à la zone rouge encadrée zoomée [96].

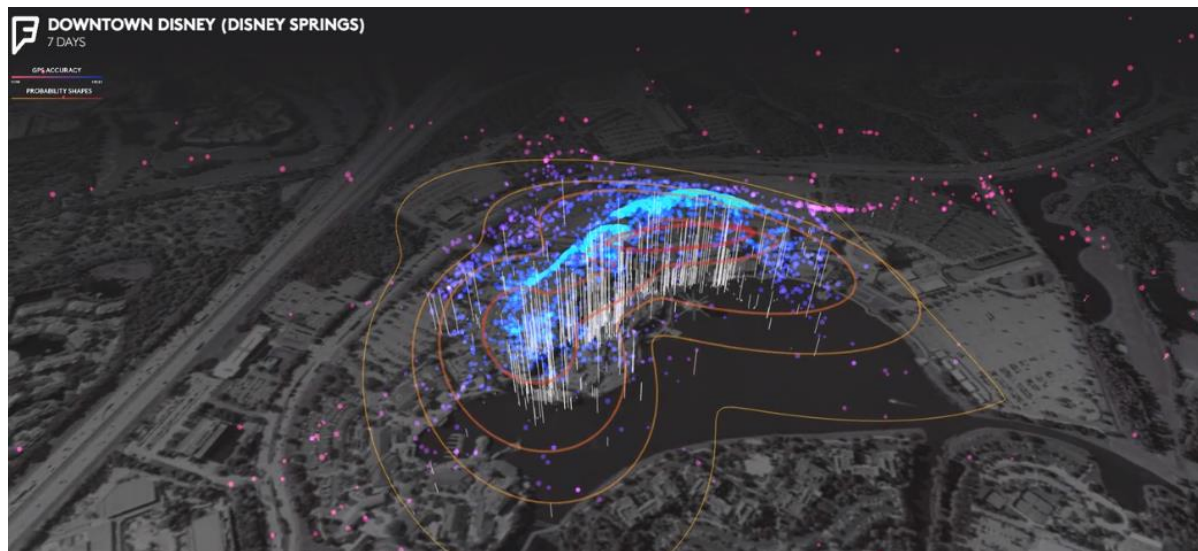
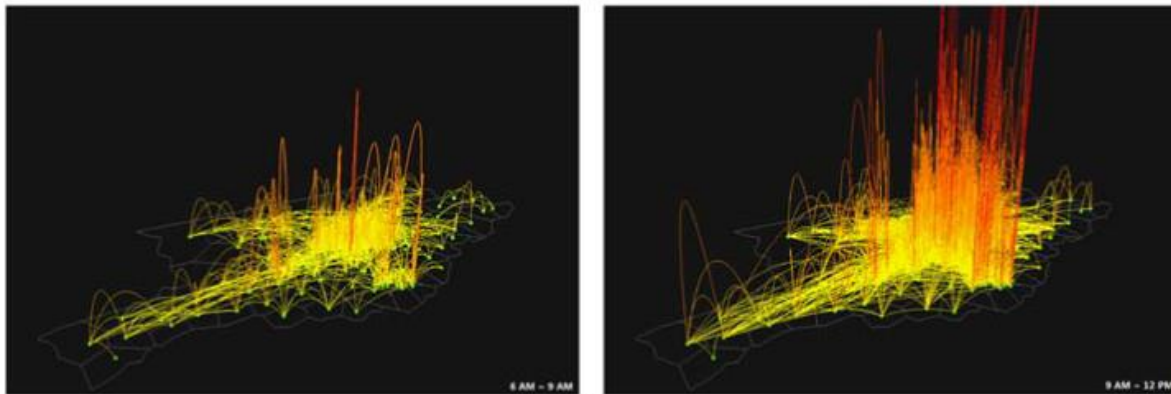


Figure 17 – La figure montre les signaux de plusieurs milliers d’enregistrements (« check-in ») survenus au centre principal de Disney sur une période de 7 jours. Les couleurs rose et bleu indiquent respectivement une faible et forte précision du signal GPS. La hauteur du point est caractérisée par l’intensité du signal, c’est-à-dire la popularité d’un même enregistrement, par exemple [97].

#### 1.1.2.4 Approches linéaires 3D

L’approche de représentation linéaire 3D tout comme les approches linéaires 2D sont souvent utilisées pour représenter des trajectoires [56], du trafic [83], et des données météorologiques [63], [74], [98]. Normalement, la hauteur de la courbe utilisée met l’emphase sur l’importance du phénomène représenté [90]. Par exemple, [95] ont utilisé des courbes verticales de Béziérs pour représenter le flux horaire des appels téléphoniques (cf. Figure 18). La hauteur des arcs représente le volume relatif des appels téléphoniques. Les arcs hauts et étroits montrent une forte communication d’appel dans un espace intra-urbain proche. D’autres études ont étudié la représentation du trafic aérien ou naval à l’aide de trajectoires et de flux 3D [56] (cf. Figure 19). Elles peuvent aussi servir pour la représentation de phénomènes météorologiques comme

la pluie, le vent, l'humidité, la température, l'eau, etc. Dans ce cas, la variabilité de ces phénomènes peut être illustrée au moyen de flèches ou en faisant varier la taille et la couleur des lignes 3D [63], [98] .



*Figure 18 - Courbes de Bézières verticale : Visualisation 3D des modèles de flux d'appels téléphoniques. Les points verts sont les emplacements des stations de base mobiles. La hauteur et la couleur (respectivement rouge pour très intense ; orange pour intense et jaune pour normal) des arcs représentent le volume relatif des appels téléphoniques. Les arcs hauts et étroits montrent une forte communication d'appels dans un espace intra-urbain proche. Chaque arc représente un flux reliant deux stations mobiles [95].*

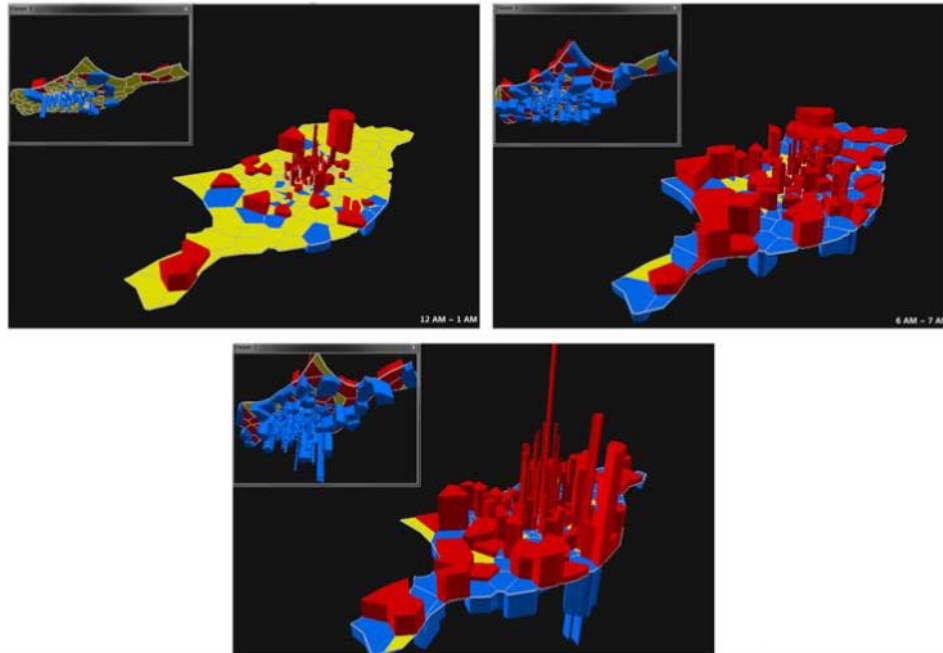


*Figure 19 – Cette visualisation montre les bateaux et avions-cargos entrants (bleu) et sortants (orange) de Singapour [98]. Une plus grande épaisseur de trait montre une plus grande activité d'import-export.*

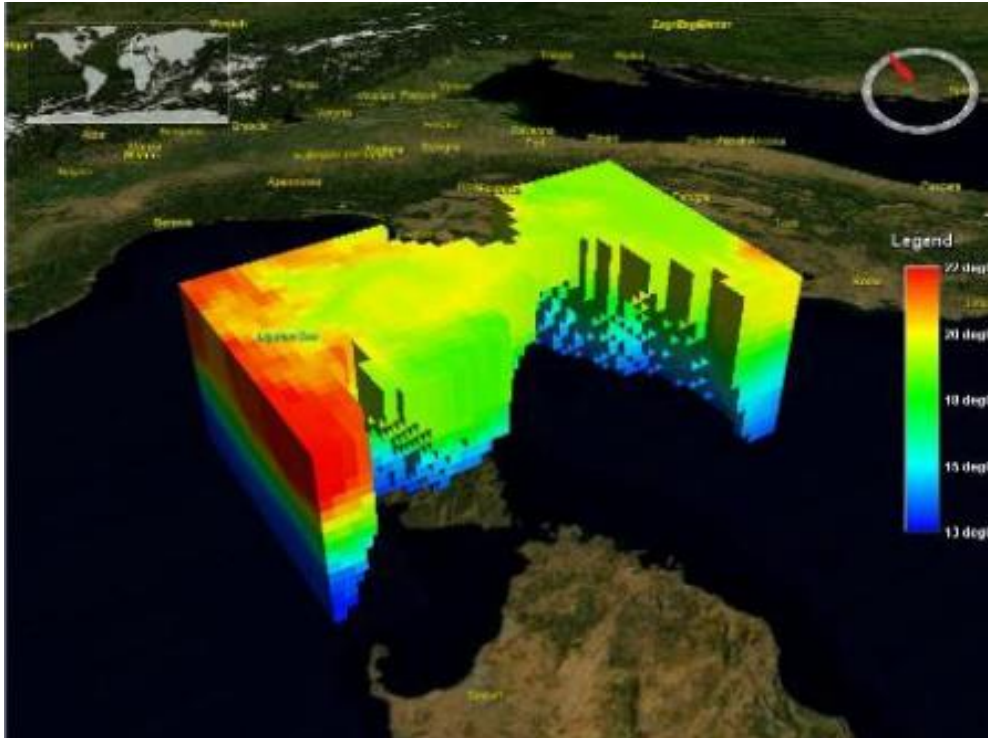
### 1.1.2.5 Approches basées sur les régions 3D

Dans certaines approches basées sur les régions 3D, la dimension sémantique vient compléter la représentation adoptée pour les régions 2D. Elle est alors représentée selon l'axe des Z afin d'illustrer la valeur d'un attribut, par exemple une population [65], [99], ou bien un nombre d'événements s'étant produits dans la région [75], [95], [98]. Dans les régions 3D, la couleur, l'intensité et la hauteur sont souvent les variables graphiques utilisées. La couleur est utilisée pour montrer des catégories, tandis que l'intensité et la hauteur sont utilisées pour montrer un ordre de valeurs. Par exemple, dans l'étude menée par [95] sur la visualisation de signaux téléphoniques, le nombre d'appels téléphoniques entrants et sortants est représenté à l'aide des régions 3D en attribuant une hauteur aux régions. La couleur associée aux régions représente des catégories différentes: jaune pour un nombre d'appels entrants et sortants équilibré; bleu pour un nombre d'appels sortants supérieur au nombre d'appels entrants; et rouge pour un nombre d'appels entrants supérieur au nombre d'appels sortants (cf. Figure 20).

Les régions 3D peuvent aussi être représentées par des voxels. Ils sont utilisés de manière différente que dans le contexte des modèles urbains 3D. Dans [100], une telle approche par voxels a été utilisée pour représenter la température de l'eau à différentes profondeurs (cf. Figure 21). La couleur et l'altitude ont été utilisées à titre de variables graphiques. La couleur a été utilisée pour catégoriser la température (i.e. rouge pour chaude et bleu pour froide). L'altitude, dans le cas de cette étude, indique la profondeur de l'eau. Nous discuterons du temps plus en détail au Chapitre 2. Néanmoins, cette étude souligne qu'une telle approche pourrait impliquer n'importe quelle variable (pas uniquement la température) pour illustrer un phénomène.



*Figure 20 - Visualisation des zones dynamiques "sources" de l'appel téléphonique (rouge), des zones "creuses" (bleu) et des zones "équibrées nulles" (jaune) dans l'environnement 3D-SIG. Les trois figures représentent trois périodes de la journée : en haut-gauche la tranche horaire de 12h00 à 1h00 AM, en haut-droite la tranche horaire de 6 à 7 AM et en bas la tranche horaire de 3 à 4 PM [95].*



*Figure 21 - Modèle par voxels. La couleur des voxels illustre la température de l'eau à différentes profondeurs [100].*

### 1.1.3 Critères d'évaluation

Dans un contexte de participation citoyenne, les utilisateurs de la plateforme visée peuvent venir de milieux différents. Ils peuvent aussi utiliser un éventail d'appareils (e.g. cellulaire, tablette, ordinateur) ayant des capacités machines (e.g. CPU, GPU, mémoire) différentes. Par conséquent, il est important que les approches de représentation des informations partagées au sein de la consultation soient évaluées sur le plan de la perception, l'intuitivité et l'accessibilité. À cet effet, il est nécessaire d'établir des critères pour effectuer une telle évaluation.

Nous avons considéré deux catégories de critères : 1) les critères relatifs au domaine de la cognition et 2) les critères reliés aux capacités machines nécessaires pour coder et rendre une approche de représentation. Dans la première catégorie de critères, nous avons retenu la complexité visuelle et la surcharge cognitive. La complexité visuelle est le temps nécessaire

pour comprendre la visualisation. Plus la visualisation se rapproche du modèle mental que l'utilisateur a du phénomène à l'étude, plus l'approche sera intuitive et plus l'utilisateur comprendra rapidement [94]. La surcharge cognitive réfère à la quantité d'information montrée [94]. Certaines approches de visualisation deviennent plus chargées cognitivement que d'autres lorsque le nombre d'informations augmente, et certaines gèrent mieux la surcharge d'information que d'autres.

Dans la deuxième catégorie, nous avons retenu les deux critères suivants : 1) la complexité de l'algorithme utilisé pour coder la représentation, et 2) la puissance requise au niveau graphique, de la mémoire et du processeur de l'ordinateur pour mettre en œuvre la représentation [94]. Certaines approches de représentation nécessitent des algorithmes plus complexes que d'autres (ex. modèle par voxel vs par point). Par conséquent, ceci peut être une limitation, car un algorithme plus complexe peut nécessiter plus de ressources machines. Aussi, une approche de représentation 3D est plus exigeante en ressources machines qu'une approche 2D [34]. Une approche par modèle naturel est plus exigeante qu'une approche par points 3D. Par conséquent, il est important de prendre en compte ce critère dans un contexte de participation citoyenne, car les utilisateurs vont utiliser une série d'appareils ayant des capacités machines différentes (ex. CPU, carte graphique, mémoire).

### 1.1.4 Analyse critériée des approches de représentation 2D/3D

Les approches 2D et 3D recensées dans la littérature ont été analysées selon les quatre critères suivants : complexité visuelle; surcharge cognitive; complexité de l’algorithme de représentation; puissance requise de l’appareil de visualisation. Le but de cette analyse critériée est d’aboutir à des directives de représentation 2D et 3D adaptées à la participation citoyenne.

Une synthèse de cette analyse, mettant en évidence les points forts et les limites des approches dans un contexte de consultation citoyenne, est proposée ci-dessous (cf. Tableau 2). Pour chaque approche de représentation, l’information est répartie dans les colonnes de la manière suivante : liste des articles traitant de cette représentation; but de la représentation; types de données souvent utilisés pour produire cette représentation; variables graphiques souvent utilisées; limites de la représentation. Deux cas de figure se sont présentés lors de cette analyse : dans un cas, les articles incluaient déjà une évaluation de l’approche de représentation utilisée et donc fournissaient les informations pour compléter le tableau. Dans un autre cas, une telle évaluation était absente de l’article. Nous avons alors nous-mêmes analysé les approches selon les critères établis et nos connaissances dans le domaine.

*Tableau 2 - Synthèse de l’analyse critériée des approches de représentation 2D/3D recensées (CV = Complexité visuelle; SC = Surcharge cognitive; P = Performance; CA = Complexité de l’algorithme; Les symboles « + » et « - » signifient respectivement « favorise » et « ne favorise pas »).*

Approche	Articles	But	Type de données	Variables graphiques	Limites	C V	S C	P	C A
----------	----------	-----	-----------------	----------------------	---------	--------	--------	---	--------



<b>Discrète 2D</b>	[86], [92], [75], [28], [101], [48], [46], [49], [38], [42], [41], [36], [40], [85], [90], [18]–[20], [91]	Visualiser clairement et intuitivement des phénomènes géolocalisés.  Pour représenter des phénomènes ponctuels où la position est défini par une longitude et latitude.	<i>POIs, Check-in data, signal GPS, tweets, pickup and dropoff taxi</i>	Taille = Importance du phénomène  Couleur = Catégorie  Texte, Symbole = Catégorie ou description	++nombre de points = ++ Surcharge cognitive  <b>Solution</b> : Regrouper les points par zoom.  Ou faire un « hotspot ».	+	-	+	+
<b>Hotspot</b>	[88], [37],[75], [89], [85], [90] , [35], [102]	Interpoler les points et visualiser les zones extrêmes d'un ensemble de points.	<i>POIs, Check-in data, signal GPS, tweets, pickup and dropoff taxi,</i>	Matricielle / polygone, couleur et intensité.  <b>Couleur =</b> Classification des valeurs pour créer des zones.	-Valeurs approximées  -Valeurs estimés moins fiables pour petits échantillons de points	-	+	-	-
<b>Chloropleth Map</b>	[85], [90], [92], [37], [102]	Pour représenter de l'information regroupée à partir de régions ou de divisions prédéterminées de l'espace	Regroupement de phénomènes ponctuels, pour illustrer une attribut d'une région (e.g. code postal, arrondissement, etc.)	Taille, intensité = représenter l'importance du phénomène  Couleur = Catégorie	Faible pour révéler des phénomènes micros  Lorsque des données sont regroupées par région, la précision diminue.	+	+	+	+

<p><b>Linéaires 2D</b></p>	<p>[85], [90], [36], [88], [28]</p>	<p>Pour représenter des déplacements, la circulation, les réseaux routier et des trajectoires</p>	<p>Mobilité humaine, Transport urbain, Bathymétrie,</p>	<p>Taille, intensité = importance  Couleur = état, catégorie  Flèche = direction</p>	<p>++nombre de lignes = ++CO, ++CV  <b>Solution :</b> Regrouper les lignes pour créer des lignes plus épaisses.  .</p>	<p>+</p>	<p>-</p>	<p>+</p>	<p>+</p>
<p><b>Modèles 3D urbains</b></p>	<p>[15], [16], [67], [68], [72], [80], [81], [31], [32], [52], [53], [55], [57], [58], [61]</p>	<p>Montrer un phénomène urbain lié aux bâtiments d'une ville.</p>	<p>-Réseaux sociaux (opinions, sentiments)  -valeur attributaire sémantique</p>	<p>Bâtiments 3D  Couleur, éclairage, intensité = Catégorie et/ou dimension sémantique</p>	<p>Subit de l'occlusion par les bâtiments 3D, perte d'information à l'arrière des bâtiments  <b>-Solution :</b> Utiliser la transparence et différentes vues (2D et 3D) + techniques de navigation.</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>-</p>	<p>+</p>

<p><b>Modèles 3D naturels</b></p>	<p>[15], [21], [64], [68]–[70], [72], [74], [76], [80]–[82], [28], [30]–[32], [54], [61]–[63]</p>	<p>Représenter le phénomène dans sa forme la plus naturelle possible, donc le plus proche de la réalité. Approche souvent utilisée dans le domaine du Jeux vidéo.</p>	<p>Environnement, Infrastructure urbaine, objets urbains, etc.</p>	<p>Infinité de possibilités, exemple Bâtiments 3D (différents niveaux de détails), Éclairs, Bathymétrie, etc.</p>	<p>Peut subir des déformations dues à la projection.</p> <p>Peut subir de l'occlusion.</p> <p>Peut demander plus de travail pour la représentation graphique que le 2D.</p> <p>Demande une plus grande capacité graphique</p> <p>Pour l'évolution de bâtiments 3D, plusieurs modèles doivent être construits</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>-</p>	<p>+</p>
<p><b>Discrètes 3D</b></p>	<p>[19], [20], [40], [68], [76], [97], [90], [98]</p>	<p>La position de l'objet est représentée sur l'axe des X, Y et Z.</p> <p>Une 4<sup>e</sup> dimension (sémantique) peut venir se greffer au point. Celle-ci représentée par une variable graphique.</p>	<p>-Réseaux sociaux, (tweets, <i>check-in</i>, <i>sentiment</i>), appels téléphoniques, SMS, etc.</p> <p>-Nuage de points (X,Y,Z)</p> <p>-POIs</p>	<p>Taille = Importance du phénomène (ex. nombre d'événements)</p> <p>Couleur = Catégorie et/ou dimension sémantique</p> <p>Texte, Symbole = Catégorie ou description</p>	<p>-Occlusion générée par la 3D.</p> <p>-Augmentation du nombre de points. Lorsque le phénomène est non visible.</p> <p><b>-Solution :</b> Interpolation par densité de Kernel.</p>	<p>+</p>	<p>-</p>	<p>+</p>	<p>+</p>

<p><b>Linéaires 3D</b></p>	<p>[57], [64], [69], [71], [75], [84], [95], [98]</p>	<p>La ligne 3D peut avoir trois coordonnées spatiales (X,Y, Z) pour représenter un déplacement spatial.</p> <p>La ligne 3D peut avoir deux dimensions spatiales et une dimension sémantique sur l'axe des Z.</p>	<p>-Phénomènes météorologiques (vent, pluie, température, humidité, etc.)</p> <p>-Trafic, circulation routière / aérienne</p> <p>-Trajectoires (déplacement entre deux points)</p>	<p>Hauteur, Taille = Importance du phénomène</p> <p>Flèche = Direction du flux</p> <p>Couleur = État, Catégorie</p>	<p>-Occlusion générée par la 3D.</p> <p>-Augmentation du nombre de lignes 3D.</p> <p><b>-Solution :</b> Regrouper et combiner des lignes ensemble (augmenter la taille).</p>	<p>+</p>	<p>-</p>	<p>+</p>	<p>+</p>
<p><b>Régions 3D</b></p>	<p>[17], [64], [66], [68], [76], [95], [98]</p>	<p>Région utilisant une dimension sémantique sur l'axe des Z.</p> <p>Approches par Voxels, où les voxels ont avoir 3D spatiales ou 2D spatiales + 1D sémantique.</p>	<p>-Représenter un nombre d'événements survenu dans une zone (ex. signaux téléphoniques)</p> <p>-Représenter une valeur associée à une région (ex. Population, Densité de population, etc.)</p> <p>-Voxels pour représenter des phénomènes interpolés à partir de points par exemple.</p>	<p>Hauteur, Taille. Volume = Importance du phénomène</p> <p>Couleur = État, Catégorie</p>	<p>-Occlusion générée par la 3D.</p> <p><b>-Solution :</b> Utilisation de la transparence et techniques de navigation.</p>	<p>-</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	<p>-</p>

### **1.1.5 Directives de représentation 2D/3D pour la participation citoyenne**

L'analyse critériée effectuée à la section précédente a permis de mettre en place des directives de représentation pour la participation citoyenne. Selon nos recherches, il y a deux catégories émergentes de phénomènes qui guident le choix d'une représentation : les phénomènes visibles et les phénomènes invisibles dans la réalité. Le fait qu'un phénomène soit visible ou invisible implique des choix de représentations différents. Ainsi, les paragraphes suivants visent à expliquer les grandes étapes pour aboutir à la sélection d'une approche de représentation 2D ou 3D selon l'information spatiale à cartographier (cf. Figure 22).

#### **1.1.5.1 Phénomènes invisibles**

En accord avec la littérature, les phénomènes invisibles dans la réalité s'appuient directement sur des standards de représentations cartographiques. Ainsi, selon l'ancrage spatial du phénomène, différents modes de représentations spatiales sont mis à disposition : ponctuel, linéaire ou zonale. Si l'ancrage spatial du phénomène est ponctuel, alors ce sont les représentations discrètes 2D ou 3D qui seront utilisées. Notre analyse critériée montre qu'il n'y a pas de différences significatives au niveau des quatre critères d'évaluation pour le choix d'une représentation discrète 2D ou 3D. Ainsi, le choix entre ces représentations dépendra des caractéristiques spatiales (e.g. deux coordonnées spatiales vs trois) et sémantiques (i.e. utilisation d'une 4<sup>e</sup> dimension pour encoder une information supplémentaire). La forme ou la couleur peut être utilisée pour communiquer des catégories. L'intensité, la taille, l'altitude ou le volume peuvent être utilisés pour communiquer un ordre. Quant à la représentation par *hotspot* (i.e. interpolation de points), à la suite d'observations déduites au travers de la revue de littérature, je considère par expérience qu'elle peut être complexe à comprendre pour le grand public. De plus, son algorithme de génération peut être complexe à implanter, notamment dans un système architectural web. Il existe une panoplie de méthodes d'interpolation (e.g. spline, linéaire, krigeage, etc.) et certaines sont plus complexes et plus exigeantes du point de vue de la performance que d'autres (e.g. krigeage). Néanmoins, on admet que la représentation par *hot spot* est généralement connue et adaptée pour communiquer des phénomènes liés à l'environnement (e.g. température, pluie, feux de forêt). Par conséquent, elle peut être utilisée

dans ces cas bien précis. Il faut être prudent quant à son utilisation et privilégier la 2D plutôt que la 3D pour prôner la simplicité [35]. Lorsque le nombre de points augmente, il vaut mieux utiliser des techniques de réduction de l'information spatiale comme le regroupement spatial. Le regroupement spatial regroupe des données discrètes selon l'échelle spatiale. Il se manifeste ensuite sous forme textuelle (i.e. en inscrivant le nombre d'éléments regroupés en son centre) ou via la taille (i.e. en s'ajustant proportionnellement au nombre d'éléments regroupés). Ce type de technique est souvent utilisé dans les cartographies web actuelles. Par conséquent les citoyens sont déjà confrontés à cette technique ce qui facilite leur compréhension. Le regroupement de points peut aussi être fait sur la base d'une zone prédéterminée de l'espace (e.g. regrouper les points à l'intérieur d'un code postal). Dans ce cas, la directive de représentation peut basculer vers la représentation par région.

Si le phénomène est plutôt linéaire, il faut se poser la question s'il communique un flux ou du mouvement, car dans ce cas l'utilisation de flèches pour montrer la direction du flux est conseillée. En ce qui concerne la représentation linéaire 2D vs 3D, nous n'avons pas noté de différences significatives lors de l'évaluation des critères. La question à se poser pour choisir entre ces deux modes est si le phénomène nécessite une information d'altitude pour paraître intuitif. Or, pour un phénomène ne nécessitant pas une telle information (e.g. axe routier, rue, pistes cyclables), il est préférable d'opter pour une représentation en 2D. En général, les citoyens sont déjà confrontés à des représentations linéaires 2D. Par exemple, Google Maps utilise cette représentation pour visualiser des routes, des pistes cyclables et des itinéraires. À l'inverse, si le phénomène nécessite une information d'altitude (e.g. trajectoire aérienne), pour paraître intuitif, la représentation linéaire 3D est à privilégier. Lorsque le nombre d'informations linéaires augmente, le regroupement et la taille peuvent être utilisés en s'assurant que la taille est ajustée proportionnellement au nombre d'éléments regroupés.

Si le phénomène est plutôt zonal, il faut se poser la question s'il peut être lié aux bâtiments 3D d'une région. Si tel est le cas, la représentation par modèle urbain présente une alternative aux régions 2D et 3D. Par exemple, une élection provinciale peut être liée aux bâtiments d'une ville, car ce sont les citoyens qui votent et ces derniers habitent au sein des bâtiments représentant un quartier électoral. Cette approche peut rendre la visualisation plus intuitive,

car elle bénéficie de la 3<sup>e</sup> dimension naturelle des bâtiments. Si le phénomène se propage (e.g. son), alors le découpage des bâtiments en voxels est suggéré pour attribuer différentes couleurs au sein du bâtiment. Autrement, le bâtiment en entier est encodé par une couleur (i.e. catégorie) et/ou une intensité (i.e. ordre). Une représentation par modèle urbain peut être exigeante en termes de capacités machines. Par conséquent, l'utilisation de techniques pour augmenter la performance est suggérée. Le niveau de détails (LOD) et la réduction de la zone à l'étude sont des techniques permettant de limiter les demandes en termes de capacités machines. De l'occlusion peut également survenir et la transparence est conseillée pour la réduire. Si le phénomène ne peut pas être lié aux bâtiments 3D (e.g. indice d'espaces verts), alors il faut identifier si le phénomène a besoin d'encoder deux informations pour paraître intuitif. Si le phénomène n'a besoin que d'une information, la région 2D est à prôner. D'ailleurs, selon nos observations, la région 2D est moins complexe à comprendre et demande moins de capacités machines que la région 3D. Néanmoins, si le phénomène requiert une dimension supplémentaire pour encoder de l'information, alors la région 3D peut être la solution. La région 3D est aussi intéressante d'un point de vue immersif, i.e. dans un environnement complètement en 3D. La transparence est conseillée pour la région 3D pour réduire l'obstruction créée avec d'autres informations spatiales. Une combinaison des régions 2D et 3D peut être intéressante si on souhaite montrer deux informations en même temps. Dans ce cas, les représentations devront être construites avec précaution pour éviter la surcharge d'information.

### **1.1.5.2 Phénomènes visibles**

Pour représenter des phénomènes visibles dans la réalité, il y a deux choix qui s'offrent : le modèle naturel 3D ou l'application des normes cartographiques connues des citoyens. Si des normes cartographiques connues de non-experts ne sont pas disponibles et si la performance n'est pas une limite, alors, le phénomène pourra être représenté à l'aide du modèle naturel. Dans le cas contraire, des approches plus abstraites (i.e. discrète, linéaire et région) devront être privilégiées.

Il n'y a rien de plus intuitif que de représenter le phénomène dans sa représentation la plus naturelle possible pour correspondre au modèle mental de l'humain. Les informations spatiales typiques nécessitant cette approche sont les bâtiments, les arbres et les infrastructures. La transparence est de mise pour réduire l'occlusion engendrée par les modèles 3D. Une combinaison de différents niveaux de réalisme et d'abstraction peut être utilisée selon le contexte de la visualisation (cf. Introduction – Problématique) [94]. Pour favoriser la performance du rendu, une réduction de la zone d'étude ainsi que des techniques de niveaux de détails sont requises.



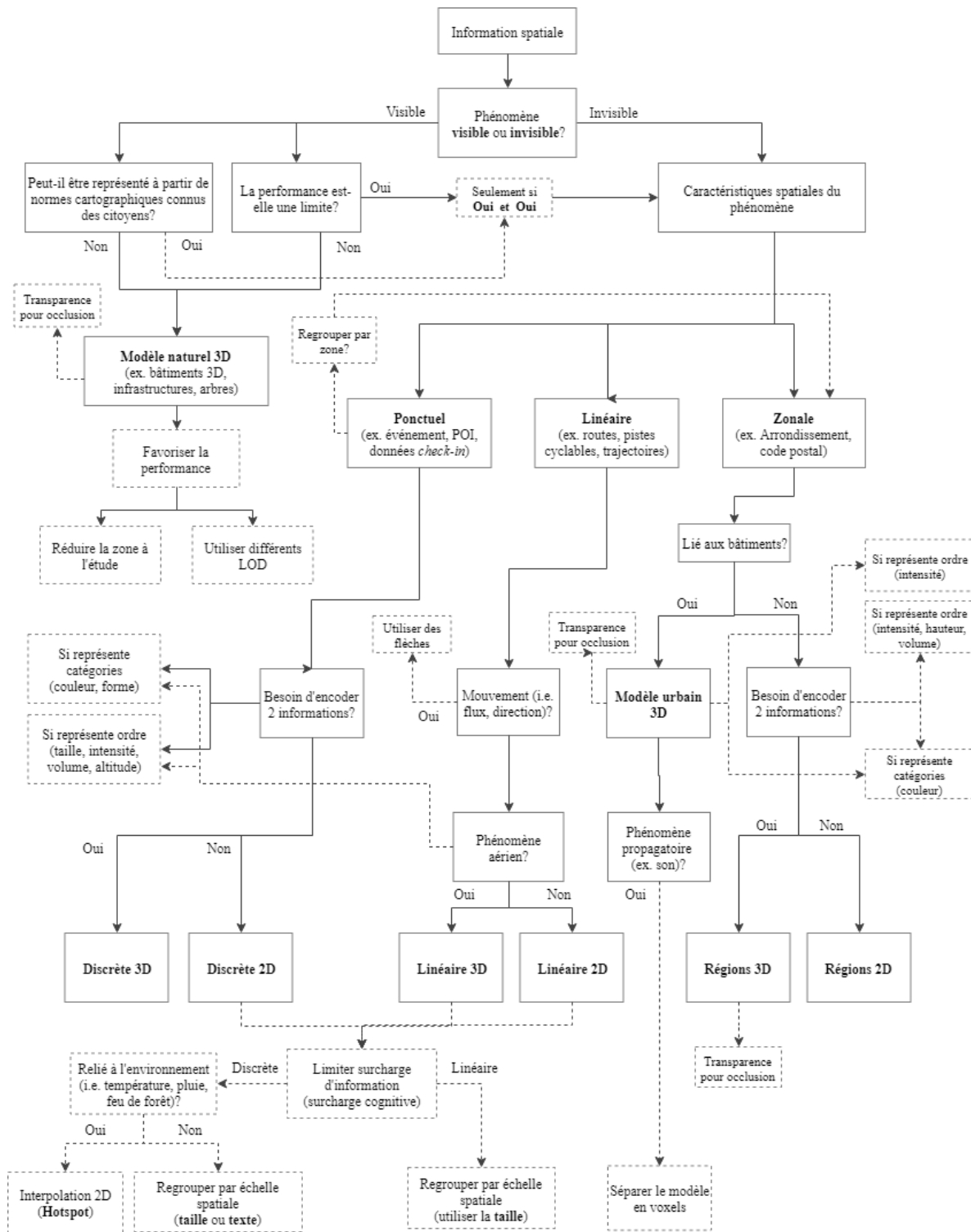


Figure 22 – Directives pour sélectionner une approche de représentation de l’information partagée dans le cadre d’une consultation citoyenne.

## 1.2 Revue des technologies de rendu 2D/3D Web

Cette section vise à passer en revue les technologies Web de rendu 2D et 3D. L'objectif est d'aboutir à la sélection d'une technologie ou des technologies pour la mise en place de la plateforme de participation visée.

### 1.2.1 Technologies cartographiques 2D

La cartographie concerne l'aspect 2D du territoire, car il s'agit avant tout d'un plan en deux dimensions, sur laquelle de l'information géographique y est représentée. La cartographie en ligne suit cette même logique, mais elle est accessible via le web. L'avantage est justement d'utiliser le web pour partager, diffuser et rendre accessible de l'information géospatiale en ligne. Parmi les API (*Application Programming Interface*) en JavaScript les plus populaires permettant de réaliser des cartographies web 2D dynamiques, on retrouve Google Maps API, OpenLayers 3, Leaflet et D3.

**Google Maps API** : Est une API développée et maintenue par Google Inc. Elle est accessible gratuitement au public pour un usage personnel. Elle offre également une panoplie de fonctionnalités (ex. calcul d'itinéraire, ajout de point d'intérêt, recherche de lieux, etc.). *Google Maps API* (GMA) est également disponible pour les développeurs qui souhaitent construire des applications web et mobiles solides. En effet, les services offerts par GMA sont très rapides, robustes et permettent de développer des applications fluides et performantes. De plus, les services offerts sont très bien documentés, ce qui permet à tous les débutants en programmation de bénéficier d'un excellent support. GMA supporte les formats de données suivants : KML (*Keyhole Markup Language*), GeoJSON (*Geographic JavaScript Object Notation*) et GeoRSS. Toutefois, GMA n'est pas *open source*. Elle offre une version gratuite avec un nombre de requêtes limitées et lorsque ce nombre est dépassé (e.g. 25 000 chargements/jour), elle devient payante [103].

**OpenLayers 3** : Est une API gratuite, *open source*, qui offre plusieurs fonctionnalités avec beaucoup d'exemples. Elle supporte aussi les standards de l'OGC et certaines projections

cartographiques et des fonctionnalités pour l'édition d'objets spatiaux. Elle est la 1<sup>ère</sup> librairie la plus utilisée après GMA. Toutefois, sa syntaxe peut être difficile à comprendre et demande parfois d'écrire plus pour faire exactement la même chose que GMA [103].

**Leaflet** : Est aussi une API gratuite et *open source* en JavaScript. En 2014, Roth *et al.* ont identifié Leaflet comme la meilleure librairie « *web mapping* » pour développer des applications mobiles, à cause de sa petite taille (28MB, v4) et pour le touchée tactile « *touch-based* ». Elle est simple, efficace et sa syntaxe est facile à utiliser. Elle est utile pour développer des cartographies web rapidement et facilement. Elle offre également beaucoup d'exemples et est bien documentée. Son seul défaut est son manque de fonctionnalités [103].

**D3**: D3 (Data Drive Documents) est une librairie en JavaScript *open source* développée et maintenue par Mike Bostock ([bost.ocks.org/mike](http://bost.ocks.org/mike)). Elle est souvent considérée pour son approche unique de rendu et d'interaction côté client. D3 soutient explicitement la projection dynamique de *linework* dans un large éventail de projections cartographiques, en utilisant un *Scalable Vector Graphic* (SVG) pour dessiner les vecteurs projetés dans le navigateur. SVG peut ensuite être exporté puis manipulé par des logiciels de conception graphique, un avantage unique, en soutenant d'autres flux de travail de conception cartographique. Enfin, D3 a été conçue pour soutenir le rendu de toute visualisation interactive [103], et pas seulement pour la visualisation de représentation géospatiale.

## 1.2.2 Comparaison des technologies cartographiques 2D

Dans une étude réalisée par [103], les technologies Google Maps, Leaflet, OpenLayers et D3 ont été comparées, dans un premier temps, du point de vue de leur capacité à réaliser un ensemble de tâches spécifiques, et dans un deuxième temps du point de vue du niveau de satisfaction des utilisateurs (cf. Figure 23 et Figure 24).

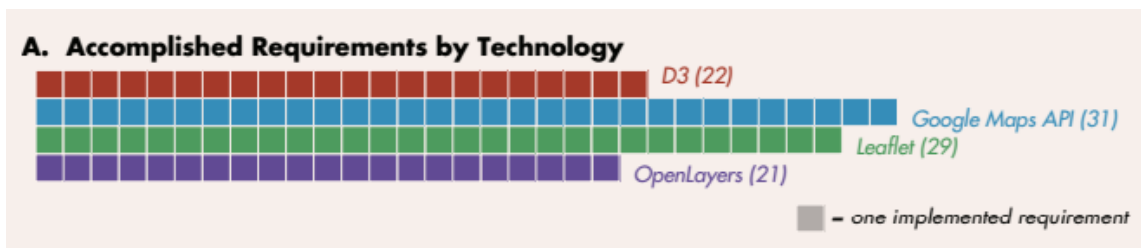


Figure 23 - Comparaison des technologies D3 (en rouge), Google Maps API (en bleu), Leaflet (en vert) et OpenLayers (en mauve) pour leur capacité à réaliser des tâches spécifiques [103].

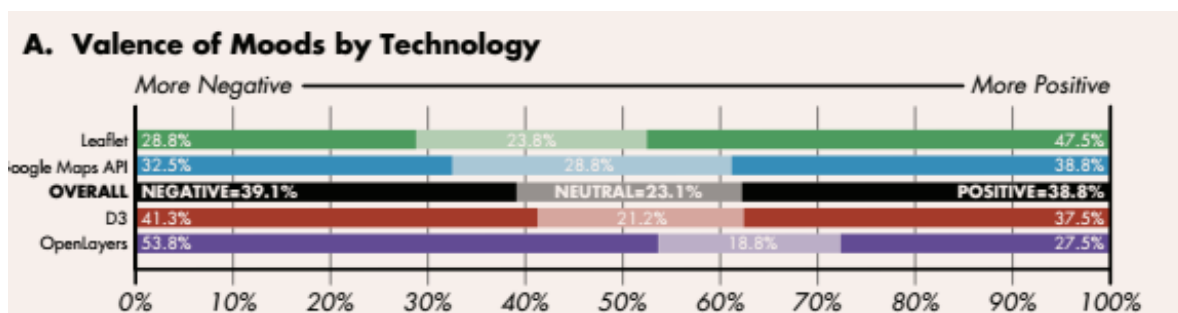


Figure 24 - Comparaison des technologies D3 (en rouge), Google Maps API (en bleu), Leaflet (en vert) et OpenLayers (en mauve) en terme du niveau de satisfaction des utilisateurs [103].

Les technologies Google Maps API ont réalisé plus de tâches (31) que les autres technologies. D'un autre côté, Leaflet le suit de très près avec 29 tâches réalisées. Les utilisateurs se disent plus satisfaits avec Leaflet (47,5%) qu'avec Google Maps API (38,6%). Ainsi, pour un projet dont le coût est une barrière, Leaflet est une bonne alternative à Google Maps. Dans le cas où le coût n'est pas un obstacle, Google Maps API est mieux adapté. Outre les technologies pour rendre du contenu 2D sur le web, il y a des techniques pour rendre du contenu 3D sur le web.

### 1.2.3 Technologies cartographiques 3D

Au niveau du rendu 3D sur le web, il existe deux façons de procéder : les scènes virtuelles et les globes virtuels. Une scène virtuelle est un environnement dans lequel un modèle 3D (e.g.

modèle 3D d'une ville) peut y être inséré et visualisé. L'utilisateur peut interagir avec la scène virtuelle si celle-ci a été configurée de la sorte. Un globe virtuel est une représentation virtuelle 3D de la Terre qui peut afficher plusieurs vues de la planète de même que ses phénomènes naturels et humains [104]. Il existe plusieurs technologies disponibles pour rendre les données 3D (incluant les scènes virtuelles et les globes virtuels) sur le web, et plus spécifiquement dans un navigateur web côté client. La plupart de ces technologies utilisent des *plug-ins* [64]. Toutefois, aujourd'hui la préférence est donnée aux technologies ne nécessitant aucun *plug-in* puisque cela rejoint un plus grand nombre d'utilisateurs (i.e. multi-plateformes et multi-navigateurs) [60]. Généralement, ces technologies sont basées sur HTML5 et la librairie JavaScript (JS) WebGL. WebGL est une spécification d'interface graphique basée sur OpenGL et HTML5, elle fut créée par Khronos Group (<https://www.khronos.org/webgl/>). WebGL est pris en charge par tous les principaux navigateurs tels que Safari, Chrome, Edge et Firefox [105]. WebGL est largement utilisé pour développer des applications Web 3D dédiées à la visualisation. WebGL permet un rendu rapide et efficace des informations 3D sur le Web en accédant aux capacités graphiques de l'ordinateur [105].

#### **1.2.4 Scènes virtuelles**

Une scène virtuelle est un environnement dans lequel un modèle 3D (e.g. modèle 3D d'une ville) peut y être inséré et visualisé. L'utilisateur peut interagir avec la scène virtuelle si celle-ci a été configurée de la sorte. Une scène virtuelle n'est pas naturellement destinée à rendre et visualiser des données géospatiales, mais elle peut être utilisée pour le faire. De toutes les scènes virtuelles 3D existantes, Three.js et X3DOM (eXtensible 3D Graphics Document Object Model) ont été largement utilisées [60].

**X3DOM** : Est un *framework JavaScript open source* pour créer des scènes 3D déclaratives<sup>11</sup> dans des pages web (cf. Figure 25). Il ne nécessite aucun *plug-in* pour afficher la scène X3DOM. X3DOM signifie X3D (eXtensible 3D Graphics) + DOM (Document Object Model), et décrit le concept d'interaction et la représentation hiérarchique qui est associée avec le contenu d'une page HTML [60]. [64] ont utilisé X3DOM pour rendre 823 bâtiments très simplifiés (LOD1). Ils ont noté que la performance obtenue était relativement bonne et par conséquent l'interaction au sein de l'application était fluide. D'autre part, [16] ont également utilisé X3DOM pour rendre plusieurs bâtiments et objets 3D au sein de leur plateforme. Ils n'ont pas spécifié la quantité de bâtiments rendue, mais ils ont noté une dégradation de la performance obtenue lorsque trop de bâtiments 3D étaient rendus en même temps. Ils terminent en mentionnant qu'X3DOM possède des limites en termes de performance de rendu lorsque trop d'objets sont rendus à la fois. Néanmoins, des ajustements au niveau de la structure de l'arbre gérant les objets 3D au sein de la scène, peuvent être faits pour optimiser cette performance.

Ses avantages sont :

- Déclaratif, bon pour développer un prototype rapide.
- Pas besoin de *plug-ins* ni de logiciel côté client/serveur pour fonctionner.
- Basé sur HTML5 et WebGL.
- Beaucoup de documentation et exemples.
- Multi-navigateurs.
- Possible de développer des outils de navigation et d'interaction pour aider à utiliser l'environnement virtuel 3D.
- Facilement modifiable.
- Bonne documentation avec beaucoup d'exemples.

---

<sup>11</sup> 3D déclarative ou *declarative 3D* : Est un concept utilisé signifiant qu'il est possible de créer et afficher une scène interactive 3D en utilisant une représentation textuelle telle que HTML (<http://doc.x3dom.org/>).

Inconvénients :

- Absence de fonctionnalités déjà présentes pour la gestion du temps (e.g. axe de temps et horloge).
- Absence de système de tuilage 2D ou 3D pour rendre une grande quantité d'objets 3D dans la scène ce qui peut être plus difficile sur la performance du rendu [16].

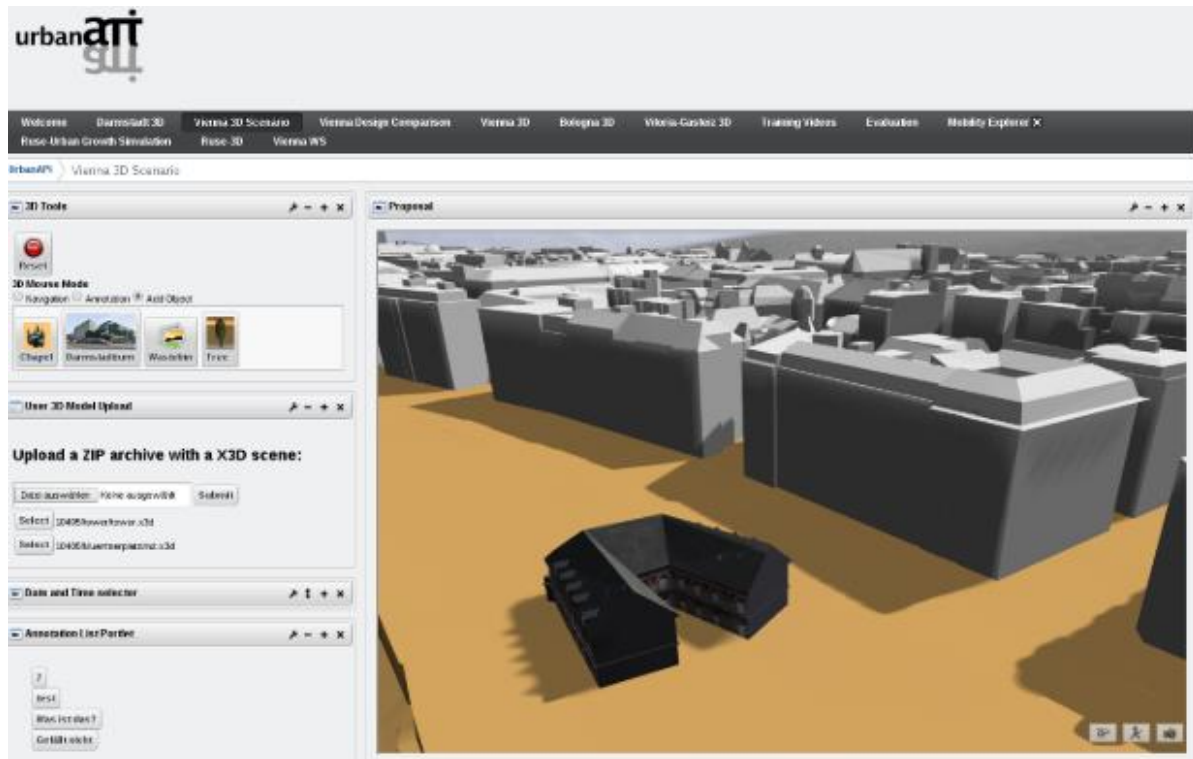


Figure 25 – Interface d'une scène X3DOM par les auteurs [16].

**Three.js** : Est une librairie *open source* de JavaScript qui permet la programmation de haut niveau dans une scène virtuelle 3D basée sur un navigateur (cf. Figure 26). Sa structure modulaire signifie que plusieurs moteurs de rendus ou « *rendering engines* » (e.g. WebGL, Canvas, SVG) ont été développés pour rendre le contenu de la scène [60]. [28] ont utilisé three.js au sein de leur plateforme pour la visualisation de données bathymétrique sur le web. Three.js facilite la création d'une scène en donnant accès aux outils tels que la caméra, les *shaders* et la lumière. De plus, il donne l'accès aux outils pour dessiner des lignes, des sphères, des particules ou un plan, ainsi que d'autres pour la représentation des données. Différents paramètres tels que l'apparence, le champ de vision de la scène ou même la couleur, la texture

ou la taille des objets peuvent être facilement ajustés. Néanmoins, [28] ont noté des problèmes reliés à la performance du rendu 3D et ainsi à la capacité de rendre plusieurs objets 3D en même temps dans une même scène. Three.js manque de fonctionnalités existantes permettant de gérer de manière efficace et performante le rendu des objets 3D.

Three.JS offre comme avantages :

- une scène graphique,
- plusieurs types de caméra et modes de navigation,
- plusieurs *custom shaders* préprogrammés,
- un chargement et rendu de *mesh* LoD,
- des composantes pour l'animation *allowing skeletal and morph-target animation*.
- Bonne documentation avec beaucoup d'exemples.

Finalement, en termes de capacités, Three.js est similaire à X3DOM. (<https://threejs.org/>).

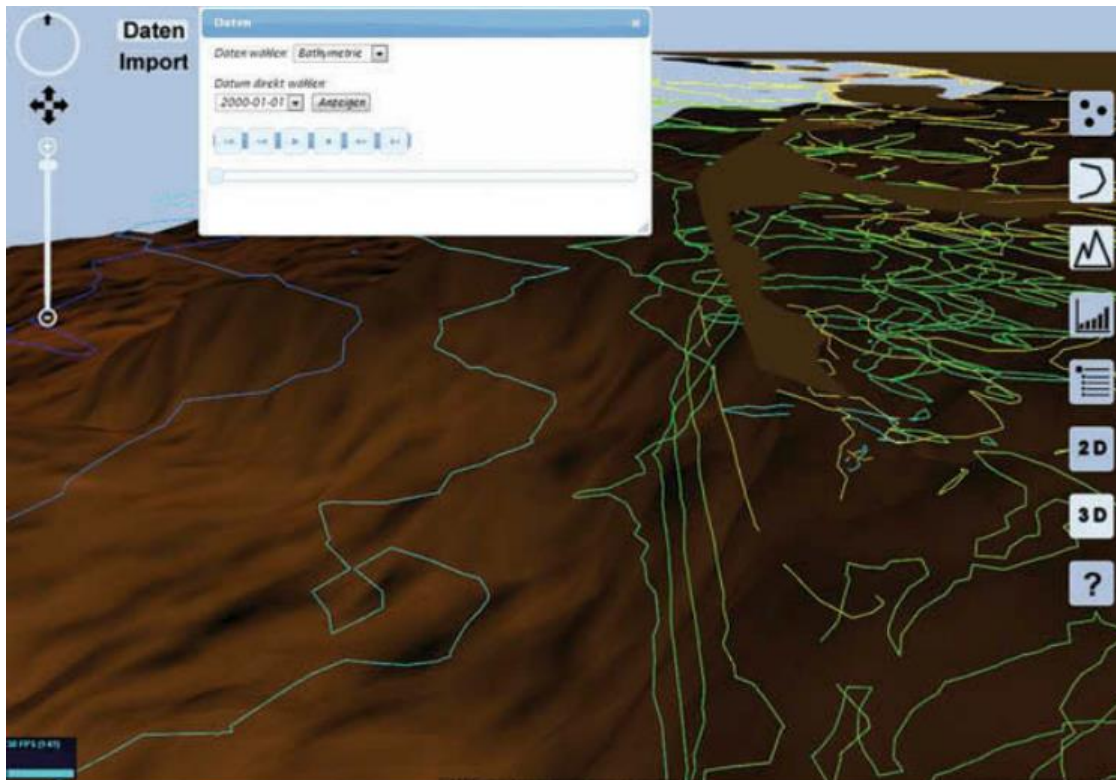


Figure 26 – Exemple d'une interface de la scène virtuelle Three.js par [28].



### 1.2.5 Globes virtuels

Un globe virtuel est une représentation virtuelle 3D de la Terre qui peut afficher plusieurs vues de la planète de même que ses phénomènes naturels et humains [104]. Ils sont catégorisés comme des plateformes ou des plateformes de visualisation, *open source* ou *closed source*, avec accès public ou accès restreint. Ces plateformes procurent le globe de base, sur lequel des données et/ou des personnalisations peuvent être ajoutées pour créer des applications de visualisation pour des régions spécifiques ou thématiques [104]. Ainsi, ils offrent la capacité de disséminer de l'information géoréférencée et peuvent servir de support à la prise de décision. Donc, un globe virtuel est purement destiné à la visualisation de données géospatiales. Un globe virtuel offre la possibilité de passer d'une vue 2D à une vue 3D grâce à la rotation [104]. Google Earth, WebWorld Wind (WWW) et Cesium.js sont actuellement les globes virtuels les plus populaires. L'un des objectifs de cette recherche est de privilégier les technologies libres d'usage (*open source*). Par conséquent, Google Earth n'est pas considéré, car il n'est pas libre d'utilisation au moment de cette recherche.

**Web World Wind (WWW)** : Est un globe virtuel écrit en JavaScript et fournit aux concepteurs de pages Web et d'applications la possibilité de créer rapidement des visualisations interactives d'informations géographiques sur un globe 3D interactif ou une carte 2D. WWW fournit une API en JavaScript. WWW s'exécute sur tous les principaux systèmes d'exploitation, ordinateurs de bureau et appareils mobiles, ainsi que sur les navigateurs Web (Nasa World Wind, <https://worldwind.arc.nasa.gov/web/>). Au cours de leurs nombreux travaux avec WWW [19], [20], [91], [100], [106], Brovelli et al. vantent le côté polyvalent de WWW et sa capacité à être personnalisable. Bien que la grande qualité de WWW semble être son côté hautement personnalisable, cela semble aussi être sa faiblesse. En effet, il y a un manque flagrant de fonctionnalités déjà développées tels que la gestion du temps et la gestion d'une grande quantité d'objets 3D (e.g. bâtiments) de manière efficace.

Ses principaux avantages sont:

- Possibilité d'ajouter des données 3D pour la visualisation.

- Multi-navigateurs.
- Multi-plateformes.
- Mise à disposition de plusieurs images de hautes résolutions et DEM (offertes par la NASA).
- Supporte l'imagerie PNG et JPEG.
- Supporte différentes formes géométriques : Polygone, ellipse, cercle, quadrilatéral, carré, polyligne, placemark, extruded polygone et texte.
- Peut intégrer des shapefiles.
- Plusieurs projections : Lat/Lon, UTM, MGRS
- Datums : WGS84.
- Supporte les services web REST, WMS et Bing.
- Plusieurs fonctionnalités d'interaction : Navigation, visualisation et sélection.
- Possibilité d'instancier plusieurs globes dans une même page web.
- Facilement extensible.

Ses principaux défauts sont les suivants:

- Manque de fonctionnalités déjà intégrées (i.e. axe de temps, horloge, gestion des LODs et tuilage 3D...)
- Documentation correcte.
- Manque d'exemples et de tutoriels.



Figure 27 – Interface de Web World Wind.

*Cesium.js* : Est une librairie JavaScript pour créer des globes virtuels 3D et des cartographies 2D dans un navigateur web, et ceci, sans utiliser de *plug-ins* [104] (cf. Figure 29). Au commencement de cette recherche, Cesium gagnait déjà en popularité. Ce qui rend Cesium intéressant sont les fonctionnalités déjà intégrées telles que la gestion du temps grâce à une horloge et un axe de temps. D'ailleurs, Cesium travaille actuellement sur un tuilage 3D qui consiste à rendre une grande quantité de bâtiments 3D dans un seul et même globe. Quelques démos notamment celle de New York sur le site web de Cesium montre une grande quantité de bâtiment (plus d'un million) rendus simultanément (cf. Figure 28). Néanmoins, il n'existait pas de moyens faciles de convertir des bâtiments 3D au format tuilage 3D de Cesium au moment de faire les choix technologiques pour ce projet de recherche. Une alternative au tuilage 3D a été développée par [57]. Il s'agit de l'outil 3DCityDB qui permet d'importer des bâtiments au format CityGML dans une base de données PostgreSQL. Ensuite, 3DCityDB offre un exportateur permettant de générer les bâtiments préalablement importés au format gltf

<sup>12</sup> dans une structure de tuilage 2D. Une extension JavaScript 3DCityDB pour Cesium est disponible permettant d'importer ce tuilage 2D pour rendre les bâtiments au sein du globe.

Ses principaux avantages sont les suivants :

- Cesium.js possède 3 vues : 3D, 2D et 2.5D.
- Cesium peut créer des scènes spatio-temporelles en utilisant le langage CZML (*Cesium language based on JSON*). Le langage CZML est basé sur le schéma du JSON, dans lequel il décrit les données géospatiales avec leurs propriétés qui peuvent varier dans le temps.
- Cesium visualise des MNT de haute résolution et peut ajouter de la donnée terrain personnalisée.
- Cesium peut importer des couches de sources multiples : WMS, TMS, WMTS, OSM, Bing Maps, ArcGIS MapServer, Google Earth Enterprise et d'autres images standards.
- Cesium permet le dessin d'objets 2D (GeoJSON et TopoJSON), 3D (COLLADA et glTF, avec animations et textures), tout en modifiant l'atmosphère, l'éclairage, l'eau...
- Cesium ne nécessite aucun *plug-in*.
- Bonne documentation et plusieurs exemples disponibles.

Ses principaux défauts sont:

- Absence de support pour le chargement dynamique de « tuiles » (*dynamic loading*) pour de grands modèles urbains 3D (au moment où cette recherche a été réalisée). Ainsi, [57] propose une alternative pour venir pallier ce problème en créant une extension dans Cesium pour permettre le tuilage.

---

<sup>12</sup> Gltf : GL transmission format (Gltf) est un format de données 3D basé sur le JSON pour le web : <https://www.khronos.org/gltf/>

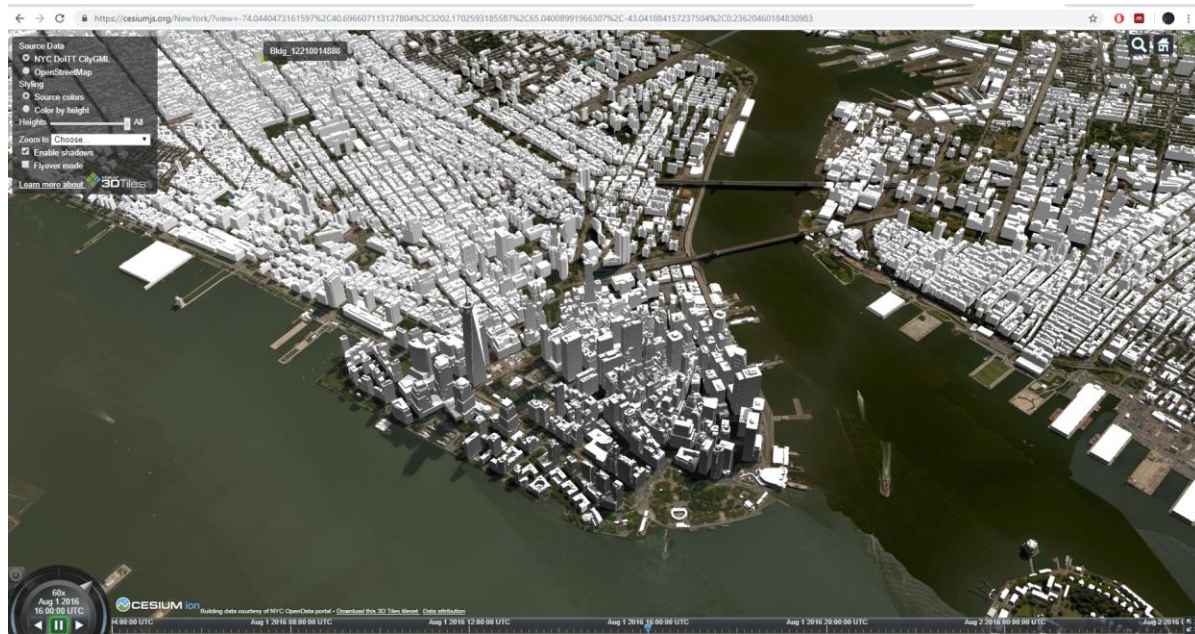


Figure 28 – Démo NewYork pour les tuiles 3D de Cesium.



Figure 29 – Interface principale du globe virtuel Cesium.js.

## 1.2.6 Comparaison des technologies web de rendu 3D

Les scènes virtuelles Three.js, X3DOM et les globes WWW, Cesium.js ont été analysés et évalués sur la base de critères spécifiques (cf. Tableau 3). L'évaluation s'est faite en se basant sur la documentation offerte sur le site web de ces technologies. De plus, l'évaluation a été complétée avec des études ayant utilisé et manipulé ces technologies. Les critères ont été choisis en fonction des exigences de la plateforme de cartographie sur le web ciblée dans le cadre de cette recherche (cf. Introduction). Voici les critères considérés :

- Le type de rendu, i.e. une scène virtuelle ou un globe virtuel.
- Gère différent type de service web pour l'imagerie et la représentation du terrain (e.g. WMS, WFS, TMS, WMTS) ;
- Capacité de gestion du temps (i.e. axe de temps et horloge) ;
- Support pour la gestion de la référence géospatiale (e.g. gestion de la référence spatiale EPSG :4326) ;
- Système de tuilage 3D pour le rendu d'une grande quantité d'objets 3D ;
- Qualité de la documentation, tutoriels et exemples.

*Tableau 3 - Évaluation des scènes virtuelles Three.js et X3DOM et des globes virtuels Web World Wind et Cesium.js pour le rendu Web 3D. L'évaluation des critères s'est faite à partir des symboles suivants : « + » bien adapté, « O » partiellement adapté et « - » insuffisamment adapté.*

Name	Type	Imagerie / terrain	Axe de temps	Référence spatiale	Systèmes tuilages bâtiments 3D	Documentation
<b>X3DOM</b>	Scène	-	O	O	-	+

<b>Three.js</b>	Scène	-	-	O	-	+
<b>WWW</b>	Globe	+	-	+	-	-
<b>Cesium.js</b>	Globe	+	+	+	+	+

---

Les résultats de l'analyse montrent que Cesium.js est le seul qui ait répondu « bien adapté » à tous les critères d'exigence. Le globe virtuel WWW le suit de près, mais ce dernier ne possède pas de fonctionnalités déjà intégrées pour gérer le temps et les bâtiments 3D. Ainsi, Cesium.js semble être la meilleure technologie frontale actuellement disponible pour le développement de la plateforme.

### 1.3 Synopsis du chapitre

La revue de littérature réalisée dans ce chapitre a recensé plus de 60 articles traitant des approches de représentation 2D et 3D. Les domaines de recherche qui ont été investigués sont la vision par ordinateur et la cartographie numérique et web. Les approches de représentation retenues ont été confrontées à des critères de cognition et de performance. Les critères d'évaluation retenus sont : la complexité visuelle, la surcharge cognitive, la complexité de l'algorithme de représentation et la puissance de l'appareil de visualisation. Les résultats issus de l'analyse critériée montrent que les approches 2D demandent moins de capacité machine. Par conséquent, elles ont obtenu un score plus fort pour les critères de performance. Les approches 3D ont généralement obtenu un score plus fort pour les critères de cognition, puisque la représentation 3D (e.g. modèles naturels et urbains) se rapproche davantage du modèle mental humain, et par conséquent demande moins d'effort cognitivement [34], [94]. Néanmoins, une combinaison des approches 2D et 3D aide à bâtir une meilleure visualisation [34]. À cet effet, des directives de représentation appliquées à la participation citoyenne ont été proposées basées sur la revue de littérature réalisée et les résultats issus de l'analyse critériée (cf. Figure 22). Le reste du chapitre a visé à identifier et comparer des technologies

cartographiques web de rendu 2D / 3D pouvant répondre aux exigences de ce projet de recherche. Le globe virtuel Cesium.js est la technologie frontale ayant répondu au mieux aux exigences (cf. Introduction – Cadre opératoire). Par conséquent, Cesium.js sera utilisé pour le développement de la plateforme de participation citoyenne ciblée.



# Chapitre 2 – Conception d’un mécanisme de simulation spatiotemporelle 2D/3D

*Ce chapitre vise à concevoir un mécanisme de simulation spatiotemporelle dans le but de permettre aux citoyens de mieux comprendre l’impact des choix réalisés dans un contexte de consultation. Pour parvenir à cette fin, nous avons identifié premièrement, les plateformes cartographiques web intégrant des simulations spatiotemporelles 2D/3D. Les deux sections suivantes traitent 1) des méthodes de représentation spatiotemporelle 2D/3D recensées à travers la littérature ; 2) des méthodes d’analyse spatiotemporelle couramment utilisées dans le domaine de la cartographie numérique et web. Enfin, la dernière section porte sur la réalisation d’un mécanisme de simulation spatiotemporelle répondant à la problématique de cette recherche.*

## 2.1 Introduction

Une revue de littérature a été menée. 50 articles ont été recensés traitant des catégories suivantes : représentations spatiotemporelles 2D et/ou 3D; visualisation de données temporelles; analyses visuelles (*Visual Analytics*) dans les cartographies numériques (cf. Tableau 4). Les articles proviennent essentiellement des bases de données suivantes : « Taylor & Francis, Elsevier, IEEE, ACM Press, ISPRS Archives, Springer et ScienceDirect La prochaine section propose une revue des plateformes web ou de participation citoyenne web intégrant des simulations spatiotemporelles 2D et 3D. Au travers de cette revue, l’objectif est d’identifier les composantes d’un mécanisme de simulation spatiotemporelle. Ces articles se retrouveront tout au long des sections relatives à ce chapitre.

Tableau 4 - Répartition des articles traitant de représentations spatiotemporelles 2D et/ 3D ; Visualisation de données temporelles ; et analyses visuelles (Visual Analytics).

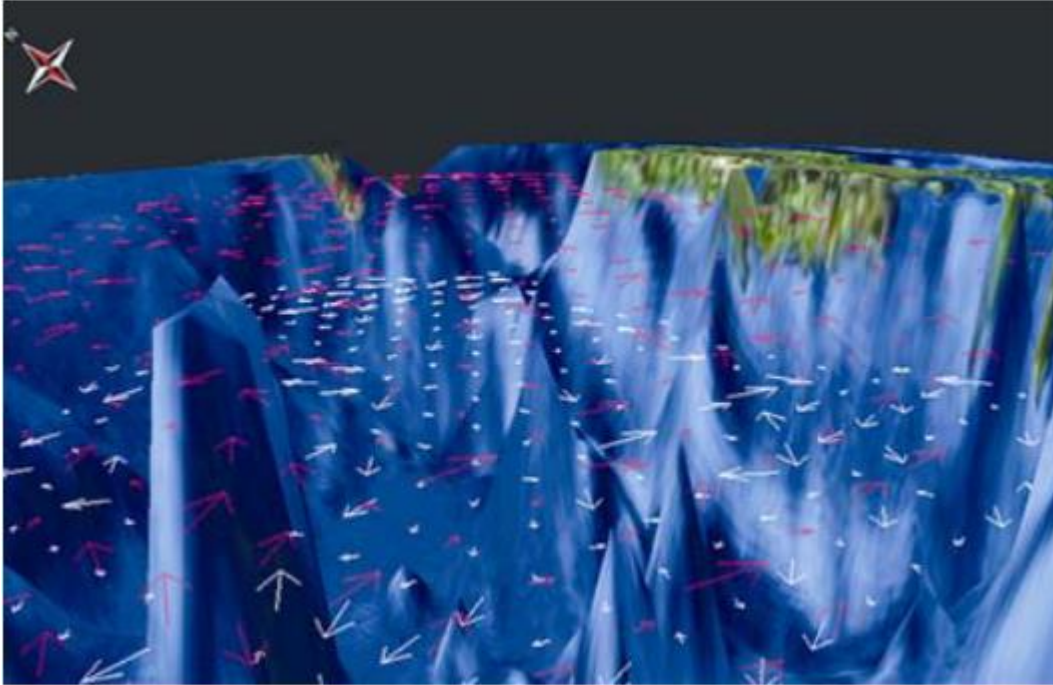
Catégorie	Nombre	Articles
<b>Représentations spatiotemporelles 2D et/ou 3D</b>	21	[28], [30], [50], [51], [54], [59], [66], [67], [74], [100], [102], [107], [36], [108], [37], [40], [41], [43], [46]–[48]
<b>Visualisation de données temporelles</b>	16	[22], [36], [109]–[114], [38], [50], [66], [67], [86], [89], [90], [107]
<b>Visual Analytics</b>	13	[85], [86], [122]–[124], [87], [115]–[121]

## 2.2 Revue des plateformes cartographiques dynamiques 2D et 3D ou de participation citoyenne sur le web

[28] et [54] ont mené une série de travaux en lien avec la cartographie web et la représentation 3D plus temps (4D). Dans [28], une plateforme web destinée au grand public a été développée pour visualiser les variations d’un niveau d’eau dans le temps. À cet effet, une approche photo-réaliste et abstraite a été utilisée pour représenter respectivement la topographie des berges et les niveaux d’eau. Les niveaux d’eau sont représentés à l’aide de courbes de niveau 3D encodant une couleur par tranche de niveau d’eau. Le mécanisme de simulation spatiotemporelle intégré à la plateforme possède trois parties discernables : 1) l’utilisation d’animations, 2) l’utilisation d’un graphique et 3) la représentation du temps via un axe de

temps linéaire. Les niveaux d'eau sont représentés à l'aide d'animations où les courbes de niveau varient en hauteur dans le temps. L'utilisateur peut contrôler l'animation grâce à des boutons (i.e. jouer, arrêt, pause, avancer, reculer, augmenter et diminuer la vitesse, choisir la période temporelle à animer). Il y a un graphique à ligne disponible pour montrer l'évolution du niveau d'eau dans le temps permettant la visualisation sous une autre perspective. Bien que le graphique soit intéressant, car il offre une autre perspective du phénomène à l'étude, les auteurs mentionnent qu'ils ne savent pas ce que le graphique apporte en matière de perception. Dans l'étude [54], une autre plateforme web 4D a été développée. Cette fois, ce sont des éclairs en 3D qui sont visualisés sur un laps de temps. Ces éclairs sont représentés sous formes réalistes et abstraites. Encore une fois, le mécanisme de simulation spatiotemporelle mis de l'avant dans la plateforme intègre des animations, des graphiques et un axe de temps. Dans cette étude, les auteurs soulignent le manque flagrant de directives de représentation pour la 4D, qui encore aujourd'hui, reste un domaine assez peu investigué.

[108] ont développé une plateforme web destinée au public pour visualiser dans l'espace et le temps des données relatives à un environnement marin. Ils ont représenté des courants marins linéairement avec des flèches pour montrer leurs directions (cf. Figure 30). Ces flèches changent de direction dans le temps en fonction du changement des courants marins. Des méthodes d'analyse spatiotemporelle telles que le requêtage sont utilisées pour sélectionner la zone marine et la période de temps à visualiser.



*Figure 30 – Visualisation des courants marins sous forme d'un champs vectoriel en 3D*  
[108].

Ceci fait le tour des plateformes de participation citoyenne web dynamiques. Le reste des paragraphes de cette section passe en revue les plateformes dynamiques web 2D/3D. Dans [17], une plateforme dynamique est développée pour visualiser en 3D la température de la surface d'un lac au fil du temps. La température est représentée via une approche par voxels, où chaque emplacement d'un voxel représente une parcelle du lac à un moment dans le temps. Rappelons qu'un voxel est un petit cube (i.e. un pixel 3D). Donc, chaque voxel encode une couleur et une altitude qui représentent respectivement, la température du lac pour cette parcelle et le temps de prise de cette température. Il faut imaginer cette approche comme une succession de couches superposées de voxels, où chaque couche représente un moment ou une période dans le temps, un peu comme des blocs Lego uniformes de différentes couleurs et empilés les uns sur les autres. Le mécanisme de simulation spatiotemporelle intégré à la plateforme est composé de diverses méthodes, telles que l'animation, l'axe de temps linéaire, le filtrage de données et l'utilisation de graphiques. L'évolution de la température de l'eau

avec le temps est représentée au moyen d'une animation. Le changement manifesté à travers l'animation est effectué via une apparition et disparition de couches de voxels. Les techniques d'analyse spatiotemporelle comme le filtrage de données permettent à l'utilisateur de sélectionner la zone du lac et la période de temps à visualiser. Un graphique 2D est mis à disposition et offre une perspective statistique de l'évolution de la température du lac à différents pas de temps. De plus, des variables statistiques relatives à la température du lac (i.e. moyenne, médiane, écart-type, valeur maximale et minimale) sont mises à disposition de l'utilisateur. Les auteurs ont constaté plusieurs limites à leur approche de représentation 4D, que ce soit au niveau de la performance du rendu et que de la facilité de compréhension des informations communiquées. La performance est affectée par le nombre de pas de temps affichés simultanément, se traduisant ainsi par une augmentation du nombre de couches de voxels. De plus, les auteurs admettent qu'une augmentation de voxels augmente également la complexité visuelle. Ils ont utilisé le filtrage de données pour réduire le nombre couches de voxels affichées simultanément, minimisant ainsi la performance et la complexité visuelle de leur approche.

[75] ont proposé un mécanisme de simulation spatiotemporelle 3D séparable en deux composantes pour parvenir à simuler dans une plateforme cartographique numérique l'évolution d'une ville (i.e. Buffalo dans le cas de ces travaux) : (1) en utilisant un axe de temps linéaire et (2) en représentant le temps à l'aide du mouvement. L'approche mise de l'avant consiste à utiliser une série de modèles statiques 3D où chacun représente un pas de temps. De cette façon et grâce à leur axe de temps linéaire, il est possible de visualiser l'évolution de la ville de Buffalo dans le temps. Le changement temporel s'effectue via l'apparition et la disparition de modèle 3D. Les auteurs suggèrent une autre façon de représenter le temps à travers une cartographie numérique ou web. L'approche proposée consiste à utiliser une seule cartographie statique. La matérialisation des changements en fonction du temps est effectuée à l'aide de symboles montrant du mouvement, par exemple en utilisant des flèches pour représenter un flux.

[111] ont réalisé une étude visant à intégrer des représentations spatiotemporelles 2D au sein d'une plateforme web. Cette plateforme web est destinée à visualiser des « tweets » ayant un ancrage dans l'espace (e.g. latitude, longitude), le temps (e.g. 15h30, 9 juillet 2017) et des caractéristiques sémantiques (e.g. une émotion associée). L'objectif est de mieux comprendre la dynamique espace-temps des comportements sociaux liés à des événements s'étant produits quelque part dans le monde. Ils ont utilisé une cartographie web pour visualiser l'évolution de ces événements et comportements dans le temps. Les événements sont représentés discrètement en 2D à l'aide de « marqueurs ». Des marqueurs apparaissent et disparaissent en fonction de leur dépendance au temps. Cette étude exploite des méthodes d'analyse spatiotemporelle comme le requêtage pour choisir la période de temps à visualiser.

Finalement, notre constat est qu'il existe un nombre limité de travaux portant sur les plateformes web spatiotemporelles 2D / 3D. Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'on s'intéresse aux plateformes de participation citoyenne. De plus, le temps est rarement implémenté au sein de ces plateformes, malgré quelques exceptions. Ce constat n'est pas surprenant étant donné que plusieurs études soulignent fortement le manque de dynamisme dans les cartographies web actuelles [28], [30], [75], [125]. Les plateformes recensées intégrant des représentations spatiotemporelles 2D ne sont pas appliquées à la participation citoyenne. Plutôt, la majorité d'entre elles s'intéressent à visualiser l'évolution dans le temps de données issues des réseaux sociaux (i.e. sentiments, données *check-in*, POIs). Quant aux plateformes intégrant des représentations spatiotemporelles 3D, il n'y en a que quelques-unes qui sont appliquées à la participation citoyenne. Le reste des plateformes spatiotemporelles 3D recensées dans la littérature sont simplement des plateformes web de visualisation. Il y a donc des questions qui émergent à la suite de la lecture des plateformes précédentes, à savoir : 1) comment le temps est-il perçu? Est-il toujours linéaire? À cet effet, la dimension temporelle devra être étudiée plus profondément. 2) Le graphique, l'animation et l'axe de temps sont des outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle [87], mais en existe-t-il d'autres? Et quels sont les graphiques adaptés au contexte de la participation citoyenne? 3) De même, quelles sont les méthodes de représentation spatiotemporelle 2D/3D existantes et adaptées au contexte de la participation

citoyenne? Les sections suivantes passent en revue ces questions afin d’y apporter des premiers éléments de réponse.

## **2.3 La dimension temporelle**

La dimension temporelle est un sujet complexe et peut à elle seule faire l’objet d’une étude complète. Dans le cadre de ce projet de recherche, on s’intéresse au temps de sorte à mieux comprendre comment il peut être intégré au sein d’un mécanisme de simulation spatiotemporelle. Ainsi donc, le temps, par définition, est le progrès continu indéfini de l’existence et des événements passés, présents et futurs (Oxford Dictionaries, 2011). Le temps peut être représenté et mesuré en secondes, minutes, heures, jours, semaines et ainsi de suite. Il peut aussi être perçu de façon linéaire ou circulaire [87]. On utilise le temps de façon circulaire lorsque des phénomènes dynamiques sont récurrents, comme les saisons, car cela facilite l’identification de comportements redondants [85], [109]. Généralement, le type de graphique utilisé pour représenter le temps de manière circulaire est la spirale. Le temps peut aussi être vu de façon linéaire. Le temps linéaire est l’approche la plus utilisée notamment dans les systèmes de visualisation, car elle est moins complexe à gérer et à comprendre [87]. Ainsi, un axe de temps est souvent utilisé pour représenter le temps de façon linéaire. Le temps peut aussi être vu comme la composition de deux primitives : les points de temps et les intervalles de temps. Les points de temps sont un instant dans le temps tandis que l’intervalle de temps est une primitive temporelle avec une étendue. Cependant, ces deux primitives ont un objectif commun en termes de visualisation temporelle. En effet, les deux visent à comparer les données à différents moments dans le temps et observer les changements.

## **2.4 Outils et méthodes d’analyse spatiotemporelle**

Les méthodes d’analyse spatiotemporelle, aussi appelées techniques exploratoires visuelles par [109], permettent de mieux révéler les phénomènes survenus dans les données au fil du temps. Ces phénomènes sont souvent cachés et pas clairement visibles lorsqu’ils sont visualisés. Trois principaux outils et méthodes d’analyse spatiotemporelles ont été recensés : les

graphiques, le requêtage (querying), et l'animation. Il n'est pas rare de voir ces trois moyens combinés dans une même visualisation pour bénéficier des forces de chacun [121].

### 2.4.1 Les graphiques

Bien que le graphique soit des outils utilisés à des fins statistiques, il peut également servir pour l'analyse spatiotemporelle en ayant les dimensions spatiale et temporelle sur ses axes. En ce sens, le graphique est sans doute l'outil d'analyse spatiotemporelle le plus simple. Il est aussi le plus utilisé pour visualiser des données temporelles [90]. Parmi les graphiques les plus utilisés, on compte le graphique à nuages de points, le graphique à lignes, le graphique à barres, le graphique silhouette, et le graphique ThemeRiver.

Le graphique à nuage de points (aussi appelé *Scatter plot* ou *Point plot*) et le graphique à lignes (*Line plot*) sont idéaux pour représenter des données discrètes où le temps est considéré comme étant linéaire [90]. D'une part, le graphique à nuage de points est particulièrement efficace pour mettre l'emphase sur des valeurs individuelles (cf. Figure 31). D'ailleurs, au niveau perception, le graphique à nuage de points ressemble à la manière dont les objets sont distribués dans l'espace-temps à laquelle les humains sont habitués [90]. D'un autre côté, le graphique à lignes est une des formes les plus utilisées pour représenter des séries temporelles. Il permet de connecter les points d'un graphique à nuage de points afin d'étendre leur relation temporelle. Donc, il est utilisé pour représenter des données continues. Par exemple, dans [37], deux lignes encodant chacune une couleur différente pour chaque année, sont utilisées pour montrer les voyages en taxi réalisés au cours d'une année (cf. Figure 32). Néanmoins, il faut faire attention (1) à ne pas interpréter les valeurs entre deux points comme étant approximatives et (2) à ne pas connecter des valeurs non existantes pour ne pas créer de fausses conclusions. Pour contourner ce problème, des lignes pointillées peuvent être utilisées pour la période manquante.



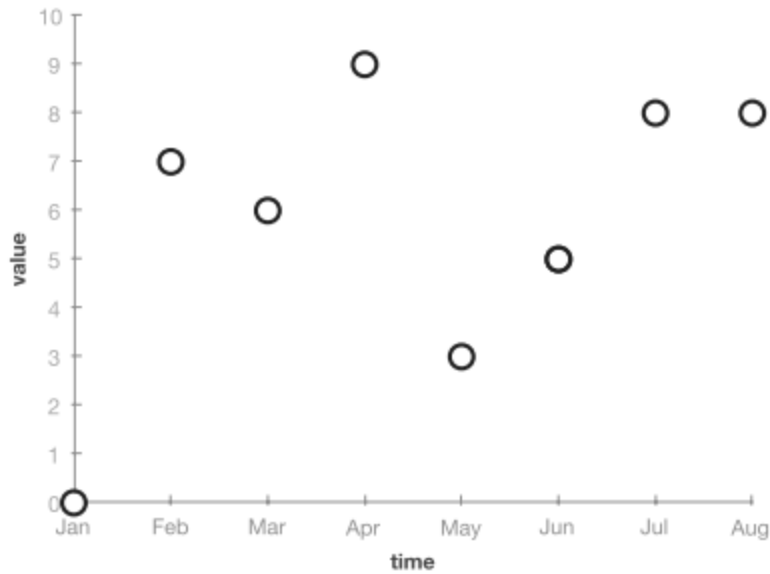


Figure 31 – Exemple de graphique à nuage de points « Scatter plot ». Les données sont distribuées dans un système cartésien où une valeur (par exemple la quantité de précipitations) et le temps sont représentés respectivement sur l'axe des y et l'axe des x [90].

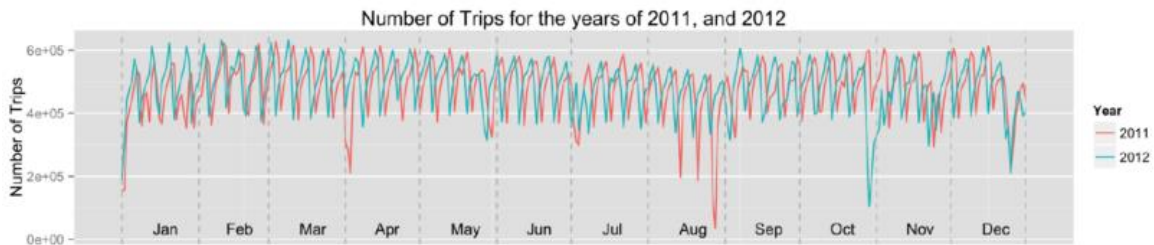


Figure 32 – Exemple de graphiques à lignes, où deux lignes sont utilisées pour montrer respectivement l'année 2011 en rouge et l'année 2012 en bleu. Les lignes montrent le nombre de voyages faits en taxi sur une période d'un an [37].

Il existe également le graphique à barres aussi appelé histogramme et le graphique à piques *Spike graph* (cf. Figure 33). La barre d'un graphique à barres représente la valeur associée à une variable donnée. Les barres sont également utilisées pour représenter des occurrences de valeurs comme c'est le cas dans un histogramme (ex. nombre d'occurrences d'un niveau de

gris pour l’histogramme d’une image) [86]. Les *Spike graph* sont utilisés dans le cas de longues séries temporelles, pour lesquelles un meilleur équilibre visuel est atteint [36].

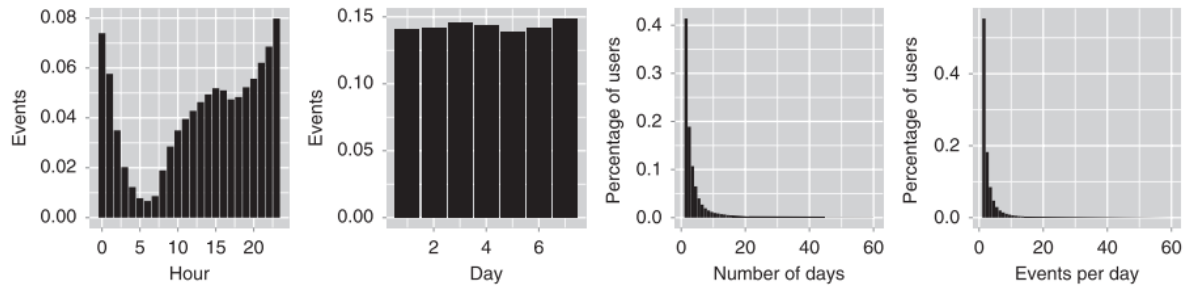


Figure 33 – Exemple de graphiques à barres (gauche) et Spike graph (droite). La longueur des barres est utilisée pour montrer la valeur associée à une variable donnée. Elles permettent de mettre en évidence les plus grandes valeurs tandis que les Spikes (i.e. barres moins larges) sont utilisés lorsqu’il y a beaucoup de données temporelles [36].

Un autre type de graphique populaire est le graphique *Silhouette Graph* et *Circular Silhouette Graph*. Ce graphique met l’accent sur la partie visuelle des séries temporelles en remplissant l’aire sous la courbe des graphiques à lignes [90]. Cela permet d’obtenir des « silhouettes » et « formes » permettant d’augmenter la perception de longues séries temporelles, au contraire des graphiques à lignes qui eux représentent seulement des lignes. Il est également utilisé pour représenter plusieurs séries temporelles différentes et celles-ci peuvent être mises côté à côté pour faciliter la comparaison. Il peut également être représenté de manière linéaire ou circulaire. La version circulaire du graphique est utilisée pour mettre l’insistance sur les phénomènes périodiques.

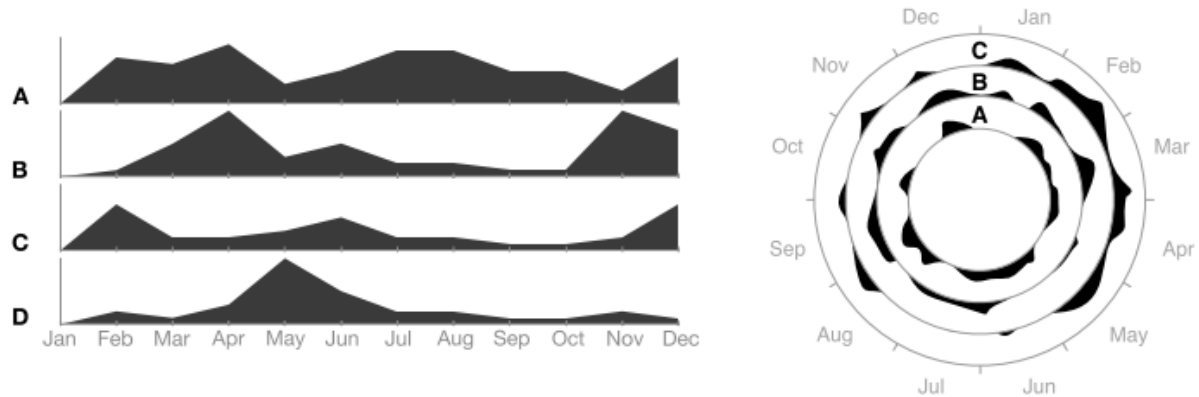


Figure 34 – Exemple de graphiques silhouettes. Le graphique de gauche est le graphique *Silhouette Graph* et celui de droite est le graphique *Circular Silhouette Graph*. Dans le cas de ces graphiques, l'aire sous la courbe est remplie. Ils sont utilisés pour favoriser la comparaison de plusieurs séries temporelles qui peuvent être mises côte à côte [90].

Un dernier type de graphique qui vaut la peine d'être mentionné est le *ThemeRiver graph*. Le *ThemeRiver* représente le changement de plusieurs thématiques dans le temps. Chaque thématique est illustrée à l'aide d'un « courant » coloré où l'épaisseur varie continuellement avec « l'écoulement » du temps. Globalement, le graphique ressemble à une rivière comprenant chaque sujet. Le *ThemeRiver* montre les thématiques qui ont été importantes à un certain moment dans le temps. Le *ThemeRiver* peut représenter des données multivariées et quantitatives [90].

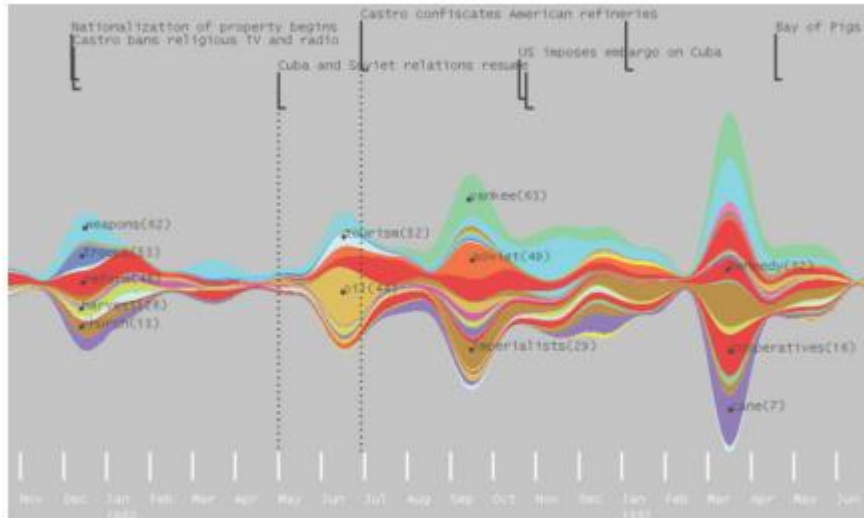


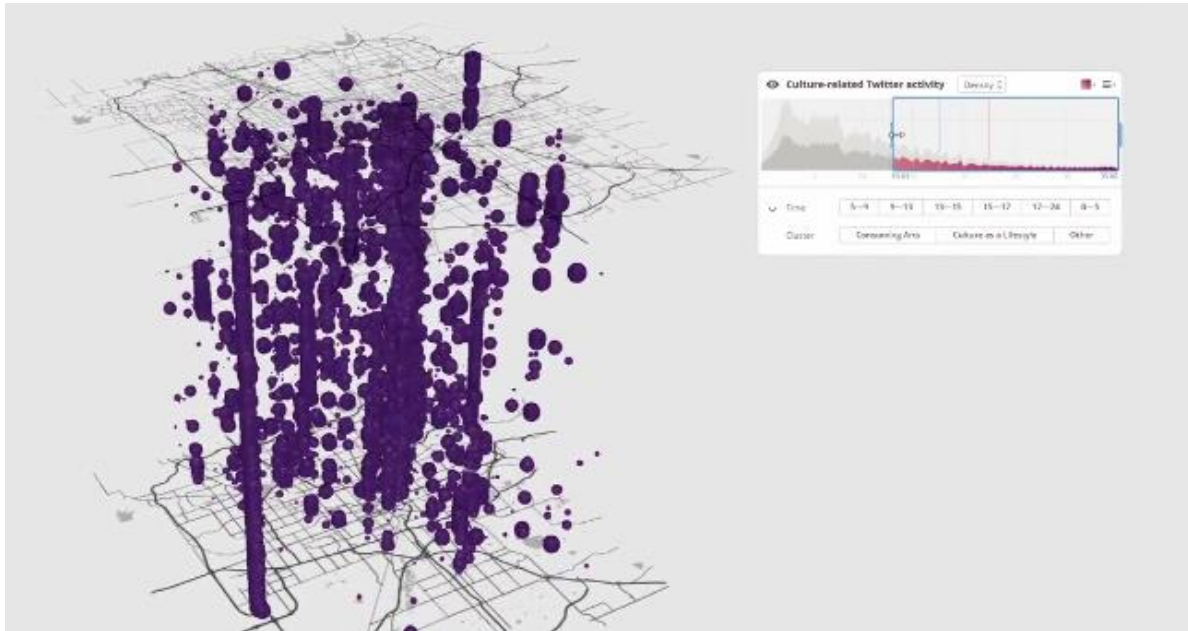
Figure 35 – Le graphique ThemeRiver montre les changements de plusieurs thématiques (sujets) dans le temps. Chaque thématique est représentée par une couleur et une épaisseur et cette dernière varie dans le temps [90].

Finalement, les graphiques qui ont été présentés ont tous un but commun. En effet, ces graphiques sont souvent utilisés comme des compléments à une cartographie pour montrer des tendances statistiques, des relations ou bien des corrélations entre les données spatiotemporelles qui sont visualisées, et ce d'un point de vue quantitatif. Dans ce contexte, les graphiques pourraient être utilisés pour mieux comprendre les liens qui existent entre les données spatiotemporelles qui sont visualisées sur une cartographie 2D ou 3D.

## 2.4.2 Le requêtage

Selon [109], le requêtage présume qu'une application est capable de répondre aux questions de l'utilisateur concernant les données analysées. Le requêtage est important puisqu'il permet à l'utilisateur d'en savoir davantage sur l'information visualisée à l'écran. Il permet aussi de sélectionner seulement les données qu'il souhaite visualiser, par exemple en sélectionnant une période et/ou une zone spécifique (cf. Figure 36 et Figure 37). Cet aspect du requêtage est appelé le « filtrage des données » [109]. Un autre aspect du requêtage est la sélection classique

lorsqu'on clique sur le phénomène observé, une fenêtre s'ouvre et affiche de l'information supplémentaire décrivant le phénomène.



*Figure 36 – Cette figure montre le requêtage d'une période spécifique à visualiser. L'utilisateur utilise le graphique en haut à droite pour sélectionner la période qu'il souhaite visualiser [102].*

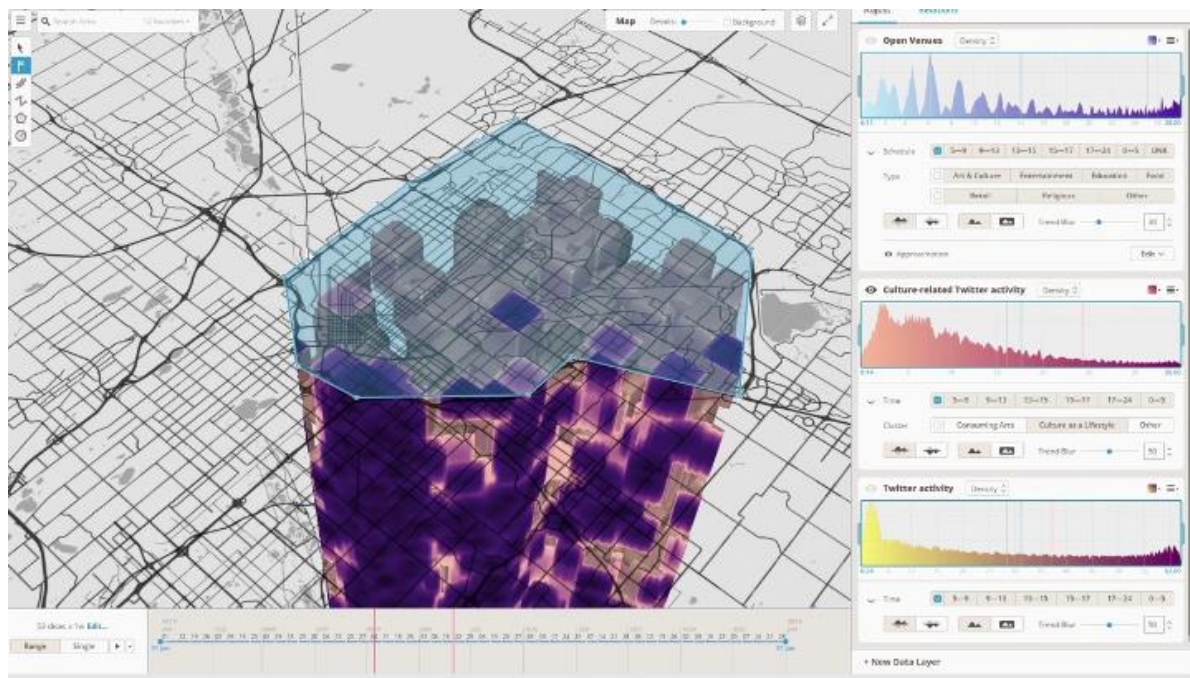


Figure 37 – La figure montre le requêtage d'une zone spécifique à visualiser. L'utilisateur utilise des outils de dessin pour construire la zone où il souhaite analyser les données [102].

### 2.4.3 L'animation

Dans le domaine de la vision par ordinateur, l'animation est définie comme la capacité d'un système à mettre à jour rapidement son contenu. Donc, les changements de données sont représentés par des changements d'affichage appelés « frames » [109]. Dans le domaine du géospatial, les animations peuvent être perçues via une succession de couches statiques où chaque couche fait référence à un pas de temps (cf. Figure 38). Selon [87], l'animation est une méthode efficace pour clairement communiquer le changement dans l'espace et le temps. À cet effet, des travaux ont démontré que l'animation est plus efficace pour observer des changements spatiotemporels qu'un ensemble de cartographies statiques affichées simultanément [87]. L'animation est souvent utilisée conjointement à un axe de temps linéaire. L'axe de temps est utile pour paramétrer l'animation en choisissant la période de temps à être visualisée. En plus de l'axe de temps, l'animation peut être contrôlée via les commandes suivantes : pause, jouer, arrêter, avancer, reculer, augmenter et diminuer la vitesse.

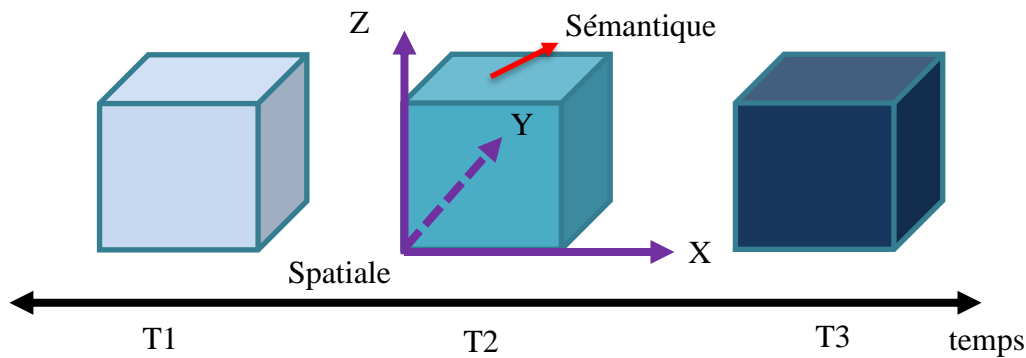


Figure 38 – Succession de couches spatiotemporelles où chaque couche fait référence à un moment dans le temps  $t_i$ . Ici, la teinte et l'intensité de la couleur de l'objet (un cube) sont associées à une variable sémantique. La valeur de cette variable change à chaque pas de temps, passant du bleu pâle au temps  $T1$  au bleu foncé au temps  $T3$ .

## 2.5 Méthodes de représentation spatiotemporelle 2D / 3D

Notre recensement des travaux dans la littérature a montré qu'il existe deux grandes catégories de représentations spatiotemporelles : les représentations statiques et les représentations dynamiques. Dans le cas d'une représentation statique, l'évolution complète d'un phénomène est représentée de manière à produire une seule image [22]. Cette capacité à visualiser l'évolution d'un phénomène dans une seule et même image constitue l'avantage principal des représentations statiques.

Néanmoins, les représentations statiques présentent également certaines limites ([90], p. 80) :

*Le fait que les représentations statiques montrent toutes les informations sur un écran est avantageux, car on peut se concentrer entièrement sur la dépendance du temps et des données. Une comparaison particulièrement visuelle de différentes parties de l'axe temporel peut être facilement réalisée en utilisant des représentations statiques. Néanmoins, l'intégration du temps et des données dans une seule vue tend à conduire à des représentations surpeuplées qui sont difficiles à interpréter. Face à de plus grands ensembles de données axés sur le temps, les méthodes analytiques et l'interaction sont obligatoires pour éviter le désordre visuel. (Traduit de l'anglais)*

Une méthode statique populaire est le cube espace-temps. Plus de détails sur cette méthode seront donnés à la prochaine section.

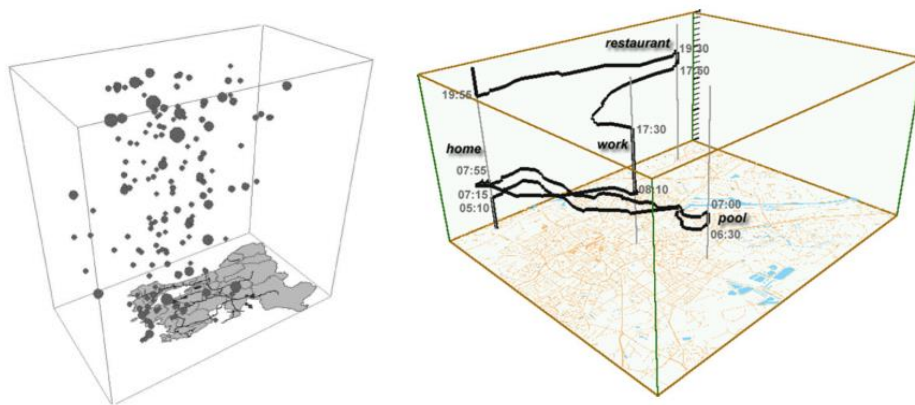
Quant aux représentations dynamiques, elles reposent souvent sur des animations [22]. À cet effet, plus le nombre d'observations d'un phénomène dynamique est élevé, mieux il est représenté à l'aide d'animations, car ces dernières communiquent assez bien la dynamique sous-jacente dans les données [90]. Les représentations dynamiques sont bien adaptées pour transmettre le développement général et les grandes tendances présents dans les données du phénomène observé [90]. Cependant, selon [90] les représentations dynamiques atteignent leurs limites en particulier lorsque de longues séries chronologiques multivariées doivent être visualisées : « *Les utilisateurs sont souvent incapables de suivre tous les changements survenus dans la visualisation, ou les animations prennent simplement trop de temps et les utilisateurs font face à un flot d'informations indigeste. Ce problème s'aggrave lorsque plusieurs animations sont utilisées simultanément (i.e. dans plusieurs vues).* » ([90], p. 80). Or, il faut porter une attention particulière à ne pas inclure trop d'information spatiotemporelle à la fois lorsque l'on construit une représentation dynamique. Les sections suivantes discutent dans un premier temps de la représentation statique (i.e. le cube espace-temps) et ensuite des représentations dynamiques.

### **2.5.1 Représentations statiques : le cube espace-temps**

Le cube espace-temps est couramment utilisé pour visualiser un objet qui possède une dimension spatiale 2D (affichée sur les axes X et Y du cube) et temporel (affichée selon l'axe Z du cube). La dimension sémantique peut aussi venir se greffer à cette représentation. Elle peut représenter une valeur attributaire encodée par la couleur, la taille, la forme ou par d'autres variables graphiques [90]. Par exemple, la taille est utilisée pour ordonner les données. Elle permet de mettre de l'importance sur les éléments ayant des tailles plus grandes (cf. Figure 39). Lorsque le nombre de points espaces-temps augmente, une interpolation par densité de Kernel peut être réalisée pour aboutir à un ensemble de voxels (cf. Figure 40). L'avantage de la densité de Kernel consiste à facilement repérer l'endroit où le phénomène a été le plus intense. Le cube espace-temps sert à localiser spatialement des objets graphiques



de manière à mieux comprendre des phénomènes dynamiques ou pour construire des trajectoires [85]. Son principal avantage visuel se situe dans la capacité à visualiser le phénomène spatiotemporel dans son « ensemble », c'est-à-dire dans une seule visualisation ou image. Par exemple, dans [109] le déplacement d'un objet dans le temps se fait au moyen de trajectoires espace-temps (cf. Figure 39). Quand le nombre de trajectoires augmente, un empilement des trajectoires peut être utilisé. Par exemple, la Figure 41 montre l'utilisation du cube espace-temps pour visualiser des trajectoires sous forme de bandes empilées. La couleur est utilisée pour encoder une variable sémantique au sein de la bande (la vitesse dans cet exemple). Il existe une panoplie d'approches de représentation spatiotemporelle basées sur le cube espace-temps recensées dans [107]. Dans le contexte de cette recherche, on s'intéresse aux approches pouvant représenter des phénomènes dynamiques urbains.



*Figure 39 – À gauche, le cube espace-temps représente des tremblements de terre (la taille représente l'intensité du tremblement) sur une période de temps, où les axes x et y permettent de localiser la position du tremblement de terre et l'axe des z le moment où il est survenu [109]. À droite, des trajectoires sont imbriquées dans le cube espace-temps pour visualiser le mouvement d'un objet dans le temps.*

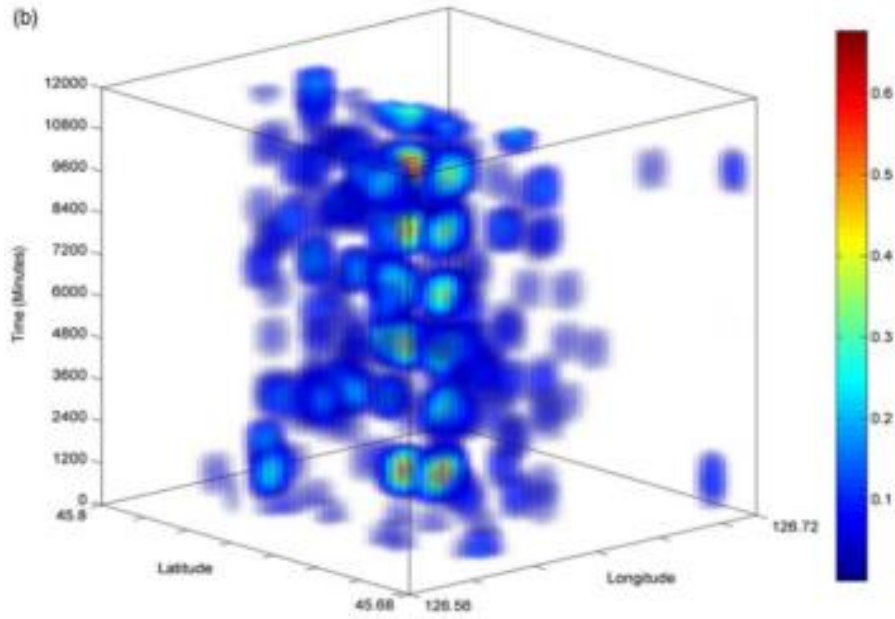


Figure 40 –La figure représente une interpolation 3D apportée à un ensemble de points, le résultat obtenu est un ensemble de voxels. Un voxel ayant une couleur rouge présente une grande activité téléphonique. Par conséquent il y a une plus grande probabilité d'appels téléphoniques pour ces heures. La méthode utilisée est l'estimation spatiotemporelle de la densité de Kernel [95].

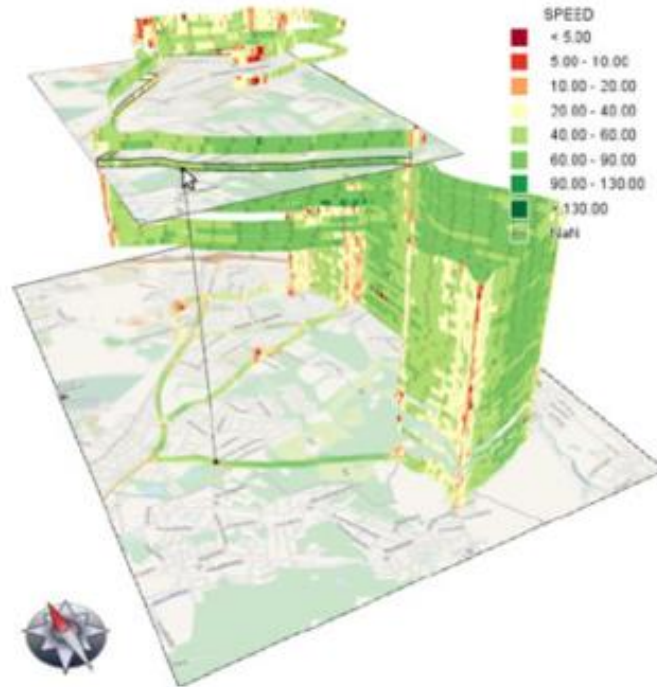


Figure 41 – Une variante du cube espace-temps permet de visualiser des trajectoires comme des bandes 3D empilées avec une couleur pour représenter une variable sémantique, ici la vitesse [109].

## 2.5.2 Représentations dynamiques

À la suite d'une revue de littérature exhaustive sur les approches de représentation spatiotemporelles 2D/3D, il s'avère que les approches qui ont été recensées au chapitre précédent (cf. Chapitre 1 – Approches de représentation 2D et 3D) peuvent également être utilisées dans un contexte temporel. Par conséquent, les méthodes de représentation dynamique sont les approches de représentation 2D et 3D (i.e. discrète 2D/3D, linéaire 2D/3D, la région 2D/3D, modèle urbain et modèle naturel) au sein desquelles les informations représentées subissent des changements selon leur composante spatiale, temporelle ou sémantique. Selon [109], il existe principalement trois types de changement observés dans les représentations dynamiques: 1) les changements existentiels, i.e. apparaître et disparaître (cf.

Figure 42); 2) les changements des propriétés spatiales 3) les changements des propriétés sémantiques.

Les changements existentiels servent à montrer les phénomènes spatiaux intervenant à un moment ou durant un intervalle de temps particulier. De cette façon, seule la couche spatiotemporelle correspondant au temps courant est montrée. Un exemple est proposé à la Figure 43 où une représentation par modèle naturel (ici des bâtiments 3D) varie dans le temps. À mesure que le temps s'écoule, les bâtiments 3D apparaissent et disparaissent selon leur dépendance au temps, par exemple les bâtiments relatifs au modèle urbain de 1927 disparaissent pour laisser place à ceux du modèle de 1966 et ainsi de suite. Selon nos observations, le changement existentiel peut aussi être cumulatif, c'est-à-dire que des couches spatiotemporelles apparaissent à mesure que le temps progresse. Dans ce cas-ci, le modèle de 1927 ne disparaît pas en 1966.

En ce qui concerne les changements spatiaux et sémantiques, il faut bien faire la distinction entre les deux, car ils peuvent apporter de la confusion selon l'approche de représentation choisie. D'une part, les changements spatiaux représentent une variation au niveau des caractéristiques spatiales du phénomène observé, i.e. un changement de position dans l'espace, une augmentation ou diminution de la hauteur, de la taille ou du volume. Par exemple, le déplacement d'une voiture ou l'agrandissement d'une zone de construction dans le temps. Dans ce cas, les variables graphiques utilisées sont la taille, la hauteur, l'orientation, le mouvement, la forme et le volume. D'autre part, les changements sémantiques représentent une variation survenue dans les valeurs attributaires du phénomène observé. Là où les valeurs attributaires manifestées à travers les variables graphiques sont donc modifiées dans le temps. Ainsi, dans ce cas les variables graphiques couramment utilisées sont: la couleur, l'intensité, la taille, le volume, la hauteur, la forme et la texture. Par exemple à la Figure 43, une approche de représentation par région 3D utilise la hauteur, l'intensité et la couleur (teinte de rouge) pour encoder une même valeur attributaire (ici la population). La couleur et l'intensité servent à montrer les régions avec une population plus (rouge) ou moins grande (blanc). La hauteur

sert à montrer une population plus (hauteur grande) ou moins (hauteur petite) importante. Au fil du temps, la population varie et les variables graphiques se mettent à jour en conséquence.

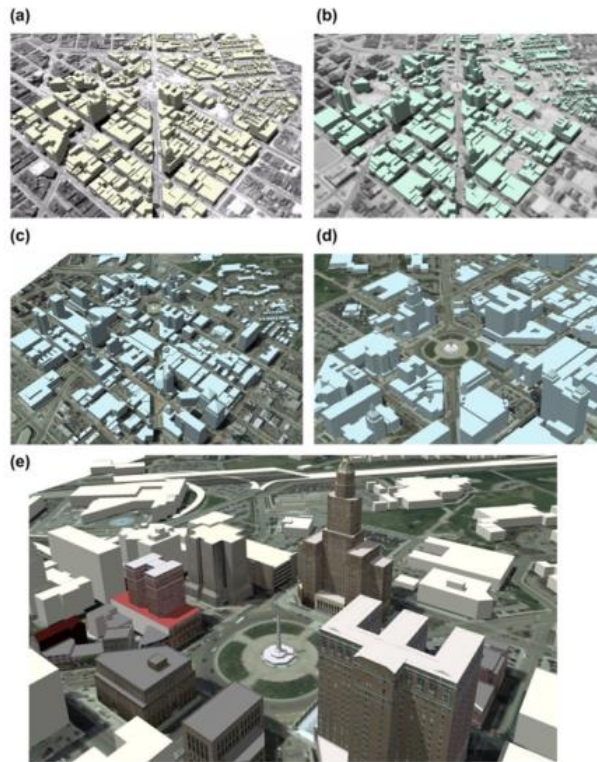
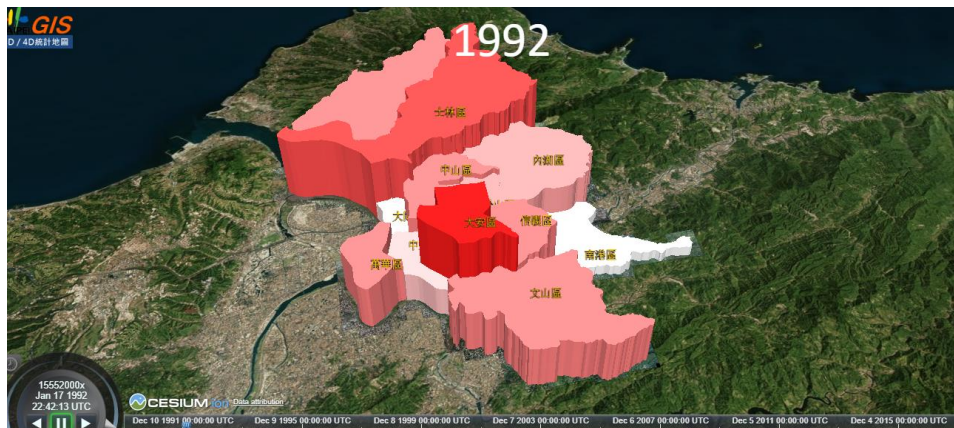


Figure 42 – Cette figure montre un type de changement existentiel où il y a une alternance entre les modèles urbains 3D visualisés. Chaque modèle représente le centre-ville à différents moments dans le temps : a) 1927, b) 1966; c), d) et e) 2000 avec différents niveaux de réalisme [30].



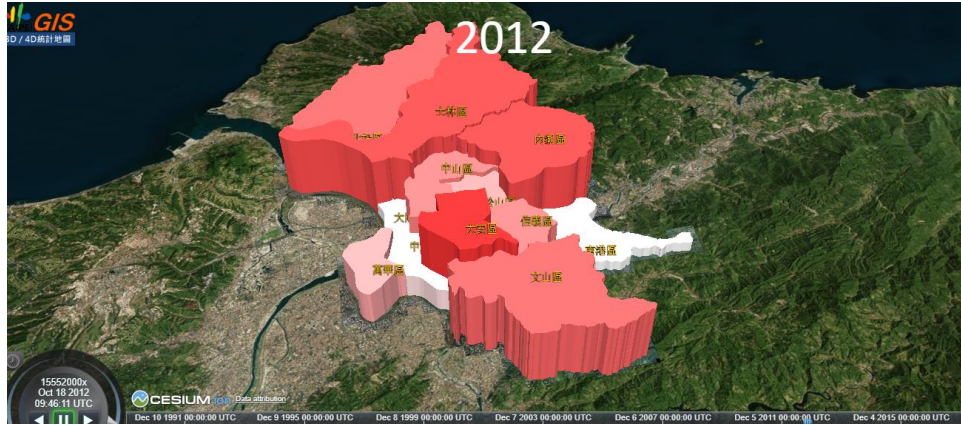


Figure 43 – Cette figure montre un changement de population entre 1992 et 2012 pour des quartiers d'une ville. La variation de la population est caractérisée par un changement sémantique manifesté à travers la hauteur. La couleur et l'intensité sont utilisées pour discriminer les quartiers ayant une grande (rouge) et faible (blanc) population [126].

Les changements spatiaux et sémantiques intervenant dans les données cartographiées sont caractérisés par les changements d'une ou plusieurs variables graphiques (cf. Figure 43). Que ce soit pour les objets 2D ou 3D, des changements spatiaux ou sémantiques peuvent s'appliquer. La différence c'est que les objets 3D bénéficient d'une dimension supplémentaire pour encoder un changement. Bref, pour chacune des variables graphiques, les changements identifiés sont les suivants [90] :

Changements spatiaux :

- **La taille** : Changement au niveau de la longueur ou de l'aire.
- **La forme** : Changement au niveau de la forme (ex. passage d'un hexagone à un cercle). Il existe une infinité de formes possibles.
- **L'orientation** : Changement de direction, par exemple le passage du Nord au Sud.
- **Le mouvement** : Changement de vitesse, direction, accélération, fréquence.
- **La hauteur et l'altitude** : Changement de valeur sur l'axe des Z.
- **Le volume** : Changement de valeur du volume caractérisé par un changement survenu dans les axes x, y et/ou z.

Changements sémantiques :

- **L'intensité** : Changement de niveau de gris, par exemple le passage de noir à blanc.
- **La couleur** : Changement de teinte correspondant à une valeur particulière, par exemple le passage de rouge à bleu.
- **La texture** : Changement de motif aussi appelé patron, par exemple le passage d'un motif rugueux à lisse.
- **Plus rarement la taille, la forme, la hauteur, l'altitude et le volume.**

Les variables graphiques n'ont pas toutes la même efficacité en matière de perception. En effet, [127] ont évalué grâce à une approche basée sur la perception, l'efficacité et l'efficience concernant le niveau de compréhension et d'intuitivité des principes de design appliqués aux affichages cartographiques 2D. Ainsi, ils ont évalué les variables graphiques principales des cartographies 2D soient : la taille, la couleur, l'intensité et l'orientation. Dans leur conclusion, ils soulignent que « la taille » est la variable graphique la plus efficace (rapide) et la plus efficace (précise) pour détecter un changement. La variable « orientation » a été démontrée comme étant la moins efficace et la moins efficace. Le changement de couleur (e.g. passage de rouge à bleu) attire davantage le regard que le changement d'intensité dans la couleur (e.g. passage de rouge pâle à rouge foncé) et le changement de direction. Le changement de couleur présente un avantage (toutefois pas significatif), lorsque comparé avec le changement dans l'intensité de la couleur. Il n'est donc pas rare en cartographie d'assister à la combinaison de ces variables graphiques afin d'obtenir un maximum d'efficacité au niveau cognitif.

La couleur est une variable graphique importante dans un contexte de représentation spatiotemporelle. Selon [90], la couleur est importante pour communiquer l'ordre temporel des différents pas de temps d'un phénomène visualisé. En ce sens, chaque pas de temps d'un phénomène est représenté par une couleur (ex. bleu) parmi une échelle de couleur (de blanc à bleu). De cette façon, un ordre est atteint et permet la discrimination de chaque pas de temps. Toutefois, comme mentionnent [90], il faut absolument que l'échelle de couleur choisie soit capable de communiquer un ordre de grandeur. Seulement alors, les utilisateurs sont capables d'interpréter la visualisation et de relier facilement les éléments visualisés à leur contexte

temporel. Normalement la couleur atteint son plein potentiel en termes de perception lorsque l'environnement englobant le phénomène visualisé est codé en nuances de gris. De cette façon, il est facile de localiser les hautes et basses valeurs dans le temps [90].

## **2.6 Élaboration d'un mécanisme de simulation spatiotemporelle adapté à une plateforme de participation citoyenne**

À la suite de cette revue réalisée sur 1) la dimension temporelle, 2) les outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle et 3) les méthodes de représentation spatiotemporelle 2D/3D, nous constatons qu'il y a trois éléments à déterminer au moment de concevoir un mécanisme de simulation spatiotemporelle adapté aux plateformes de participation citoyenne. Le premier élément concerne la représentation du temps lui-même qui peut se faire soit linéairement ou circulairement. Le second élément concerne les outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle qui peuvent consister soit en des graphiques, du requêtage ou des animations. Le dernier élément concerne les méthodes de représentation spatiotemporelle qui peut être soit : statique, soit dynamique. Les paragraphes suivants visent à éclairer la détermination de ces éléments afin de retenir seulement ceux qui sont pertinents pour répondre à la problématique de cette recherche.

### **2.6.1 Représentation du temps dans le mécanisme de simulation spatiotemporelle**

Selon [87], le temps peut être perçu de manière linéaire ou circulaire. Percevoir le temps de manière circulaire peut être complexe. D'un autre côté, percevoir le temps de façon linéaire est chose commune notamment au travers d'un axe de temps. En effet, voir le temps de façon linéaire fait référence aux événements passés, présents et futurs et ce développement est généralement bien connu du grand public [87]. Donc, selon ce raisonnement le temps linéaire est perçu plus intuitivement qu'un développement circulaire. Ainsi, afin de simplifier la compréhension d'un changement temporel, la représentation linéaire du temps, selon un axe de temps, est retenue pour le mécanisme de simulation spatiotemporelle.



## **2.6.2 Méthodes de représentation spatiotemporelle dans le mécanisme de simulation spatiotemporelle**

La méthode de représentation statique étudiée dans ce projet de recherche est le cube espace-temps. Bien que le cube espace-temps présente des avantages tels que la possibilité de visualiser l'évolution d'un phénomène en entier dans une seule visualisation, il apparaît que le cube espace-temps peut être complexe à comprendre pour des non-experts. La Figure 41 est un bon exemple montrant cette complexité. Nous croyons qu'un développement temporel sur l'axe des Z est contre-intuitif. Il est rare de voir des visualisations où le temps est représenté sur un des trois axes d'un système cartésien. Ce n'est pas chose commune à laquelle sont confrontés les citoyens en général.

D'un autre côté, les représentations dynamiques sont jugées plus intuitives, car elles reposent avant tout sur les directives de représentation déjà applicables pour la participation citoyenne (cf. Chapitre 1 – Directives de représentation). De plus, les animations impliquées dans ces approches de représentation dynamique favorisent la communication des changements survenus dans l'espace, le temps et la dimension sémantique [87]. En effet, les animations sont plus efficaces pour clairement communiquer des changements pouvant être existentiels, spatiaux ou sémantiques [109]. Par conséquent, les méthodes dynamiques de représentation spatiotemporelle ont été retenues pour le mécanisme de simulation spatiotemporelle visé dans le cadre de cette recherche.

Comme il a été présenté dans la précédente section, la représentation dynamique repose essentiellement sur les approches de représentation 2D ou 3D recensées au chapitre 1 et pour lesquelles nous avons élaboré des directives de sélection (Chapitre 1 – Directives de représentation). Ces directives n'abordent pas la représentation du changement. Dans le cadre du mécanisme de simulation spatiotemporelle, il est donc nécessaire d'établir des directives complémentaires de représentation du changement en fonction du type d'information que l'on cherche à communiquer en matière de changements spatiotemporels au citoyen. Trois types

de changements ont été identifiés : les changements existentiels, les changements spatiaux et les changements sémantiques.

S'il s'agit de montrer l'évolution de la « date de vie » de l'information dans le temps, par exemple la construction de pistes cyclables passées et futures (i.e. la date à laquelle la piste cyclable est construite), alors le changement de type existentiel est nécessaire. Le changement de type existentiel sert à montrer uniquement les éléments (ex. pistes cyclables) appartenant à un moment ou intervalle de temps précis. Le changement peut aussi être cumulatif, c'est-à-dire que les informations montrées iront en augmentant si l'ancrage au temps d'un élément (ex. 2012) est plus petit ou égal au temps courant (ex.  $2012 \leq 2018$ ). Dans ce cas, la couleur est nécessaire pour bien communiquer l'ordre temporel des éléments afin que l'utilisateur puisse bien faire correspondre chaque élément à leur contexte temporel. S'il s'agit de montrer la modification des dimensions spatiales d'une information dans le temps, alors dans ce cas le changement est plutôt spatial (ex. allongement ou élargissement d'une piste cyclable). Donc, la ou les variables graphiques suivantes position, taille, volume ou hauteur, associées à l'information concernée se modifieront dans le temps. S'il s'agit de montrer une variation dans le temps d'une variable attributaire (ex. état de la chaussée des pistes cyclables), alors un changement de type sémantique est nécessaire. Dans ce cas, les variables graphiques couleur, taille, hauteur, forme et intensité associées à la variable attributaire subissent une modification dans le temps.

Si l'utilisateur veut communiquer plusieurs types de changements à la fois (i.e. existentiel, spatial et sémantique), alors une combinaison de ces changements est possible, par exemple l'élargissement d'une piste cyclable et le changement de l'état de chaussée pour une même année. Néanmoins, il faut faire attention pour ne pas surcharger la visualisation avec trop de changements afin de ne pas créer de la confusion. Les principales directives intervenantes dans la sélection d'une représentation du changement associée aux directives de représentation 2D et 3D proposées au chapitre 1 sont présentées à la Figure 44.

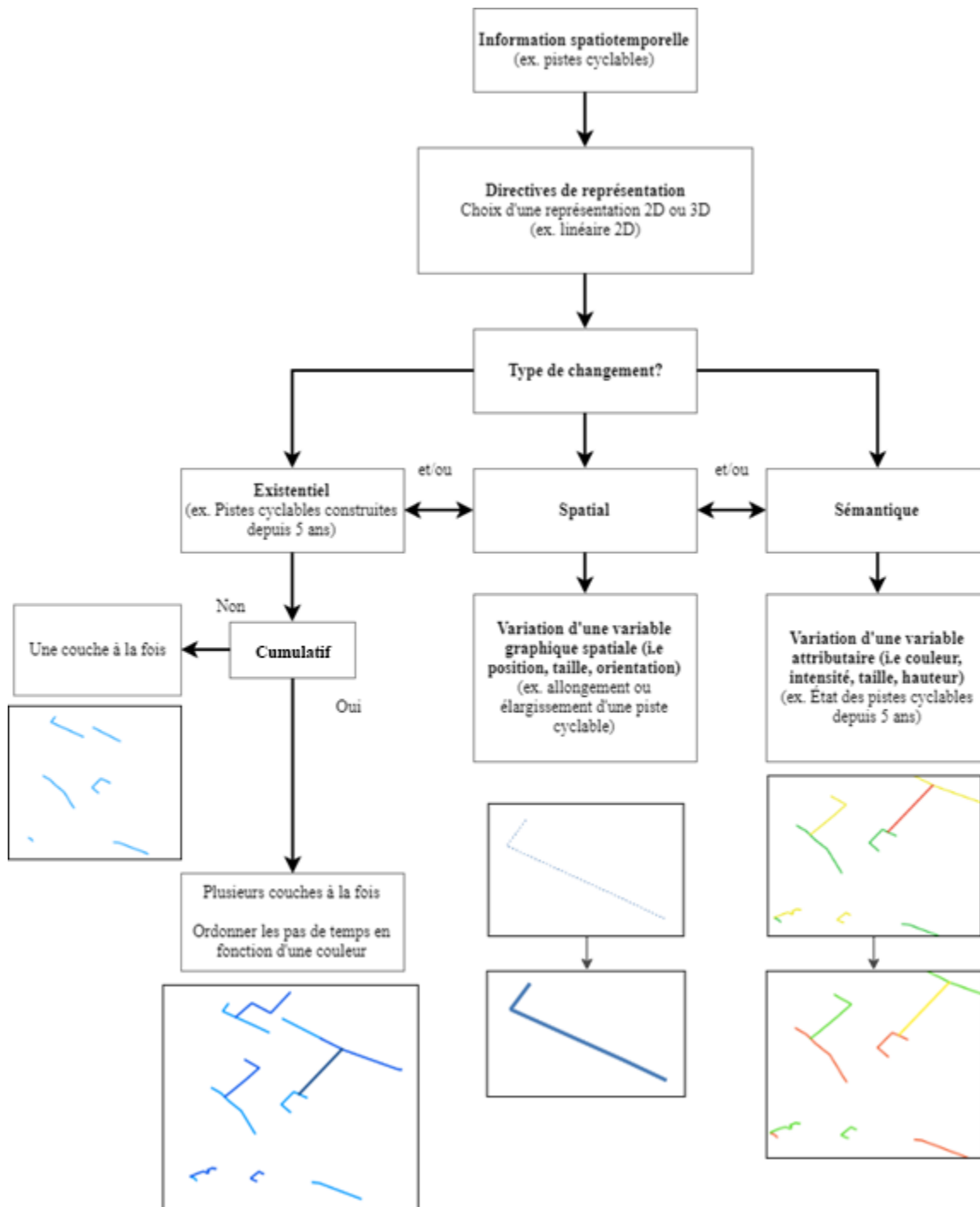


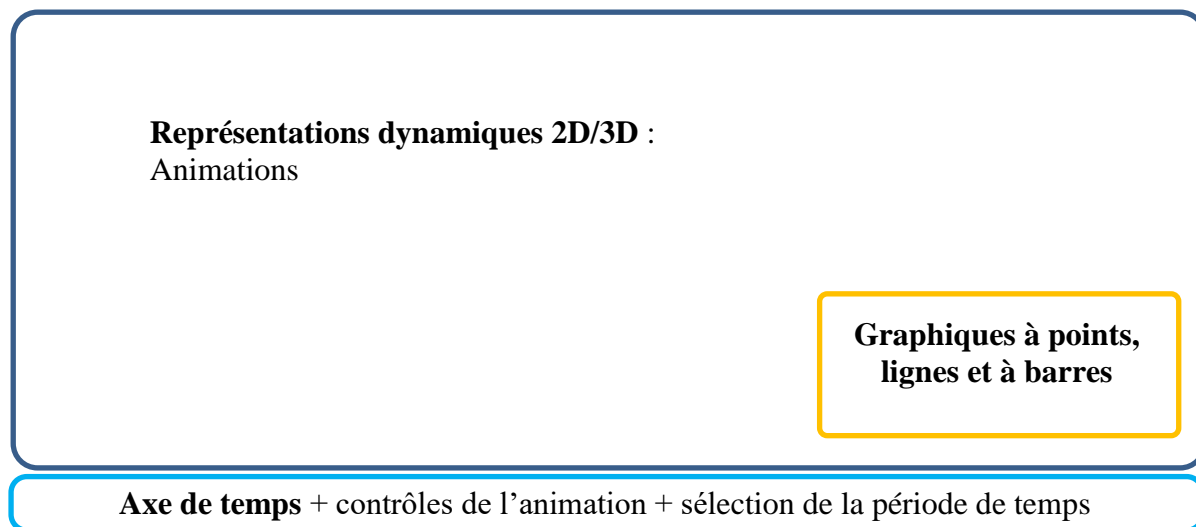
Figure 44 – Étapes pour aboutir à la réalisation d'une représentation dynamique à partir d'une information spatiotemporelle.

### **2.6.3 Outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle dans le mécanisme de simulation spatiotemporelle**

Comme il a été décrit précédemment, les outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle consistent principalement en des graphiques, du requêtage et des animations. Ces trois composantes ont été retenues pour figurer dans le mécanisme de simulation spatiotemporelle visé. Ainsi, étant donné que la visualisation du changement repose sur une représentation dynamique, les animations et les fonctions associées (i.e. mettre sur pause, jouer, arrêt ou bien avancer et reculer le temps) permettent de reculer et avancer dans le temps pour visualiser les impacts des choix qui ont été réalisés. Le requêtage permet de choisir la période temporelle à visualiser. Les graphiques visent à mieux comprendre les liens existants entre les phénomènes visualisés. Le graphique étant la forme la plus simple et la plus utilisée dans le monde de la visualisation [90], il fournit à l'utilisateur une autre perspective du phénomène visualisé. Le graphique offre aussi la capacité d'établir des relations entre les phénomènes visualisés. Donc, les graphiques pourraient permettre une meilleure compréhension des impacts engendrés par les choix réalisés lors de la participation. Par exemple, on peut penser à l'augmentation du nombre de bâtiments dans un secteur et la baisse d'un indice des espaces verts associé. Nous avons déduit que les graphiques univariés tels que le nuage de points, le graphique à barres et le graphique à lignes sont à prioriser pour assurer une simplicité et éviter de surcharger l'utilisateur avec trop d'informations. D'une part, le graphique à nuage de points et à lignes sont à privilégier lorsqu'ils sont utilisés conjointement à une animation avec changement existentiel non cumulatif ou spatial, car une seule couleur peut être utilisée. D'autre part, le graphique à barres est conseillé avec un changement de type existentiel accumulatif ou sémantique, car une couleur pour chaque pas de temps peut être attribuée à chaque colonne. D'ailleurs, le graphique doit utiliser les mêmes couleurs correspondant à l'information spatiotemporelle dans la scène, car cela simplifie la mise en relation de ces informations [90].

Par conséquent, le mécanisme de simulation spatiotemporelle élaboré dans le cadre de cette recherche intègre tous les éléments suivants : le requêtage, un axe de temps, des représentations dynamiques 2D/3D dans lesquelles le changement est illustré avec des

animations, et des graphiques. D'ailleurs, une étude a démontré que ces outils et méthodes d'analyse et de représentation spatiotemporelle tendent à être complémentaires les uns des autres [121]. La Figure 45 montre un aperçu des éléments du mécanisme disposés au sein d'une interface. La représentation 2D/3D dynamique (i.e. animation) domine la majeure partie de l'interface. Le graphique est situé en bas à droite prenant peu d'espace. L'axe de temps est positionné au bas de l'interface. Cette disposition des éléments du mécanisme est souvent mise en œuvre par les différentes applications de visualisation ayant été analysées.



*Figure 45 - Interface du mécanisme de simulation spatiotemporelle et ses éléments : cartographie et animations, graphique et axe de temps.*

## 2.7 Conclusion du chapitre

Un bilan des plateformes spatiotemporelles récentes montre qu'un mécanisme de simulation spatiotemporelle peut être composé des parties intégrantes suivantes : 1) la représentation du temps lui-même, 2) les méthodes de représentation spatiotemporelle et 3) les outils et méthodes d'analyse spatiotemporelle. Il a été retenu de représenter le temps linéairement au sein de notre mécanisme, car nous jugeons qu'il est plus intuitif à comprendre de cette manière. Selon notre mécanisme de simulation spatiotemporelle, l'évolution des informations partagées au sein d'une consultation citoyenne (e.g. projets d'aménagements) ainsi que les

impacts des choix effectués seront représentés sur la base des directives de représentation proposées (cf. Chapitre 1 – Directives de représentation 2D / 3D) et au moyen d'animations. En effet, celles-ci sont plus efficaces pour clairement communiquer des changements [109]. Elles permettront d'illustrer trois types de changements à savoir existentiels, spatiaux et sémantiques. Des graphiques offriront une autre perspective des informations visualisées et aideront à mieux comprendre les liens existants entre les phénomènes visualisés. Le graphique étant la forme la plus simple et la plus utilisée dans le monde de la visualisation [90], il fournira à l'utilisateur une autre perspective du phénomène visualisé. L'utilisateur pourra également choisir la période à visualiser grâce au requêtage et à l'axe de temps.

# **Chapitre 3 - Réalisation d'un prototype de plateforme web de participation citoyenne**

*Ce chapitre vise à valider les concepts élaborés et présentés dans les chapitres précédents. À cet effet, un questionnaire, intégrant des scénarios de consultation citoyenne, a été élaboré. Il est présenté dans la première partie du chapitre. Ensuite, le chapitre aborde les aspects plus techniques en lien avec la plateforme visée, soit l'architecture logicielle générale du prototype et ses composantes. Finalement, la dernière partie du chapitre vise à décrire le fonctionnement de l'interface et la mise en œuvre des scénarios au sein du prototype.*

## **3.1 Création d'un questionnaire de consultation citoyenne**

La validation des concepts élaborés dans cette recherche doit être réalisée dans les conditions d'une consultation citoyenne. On trouve différents outils au sein de plateforme web permettant la consultation des citoyens tels que le clavardage instantané et/ou le partage de données en temps réel [21]. Dans la présente recherche, nous avons opté pour un outil traditionnel à savoir l'usage d'un questionnaire en ligne, car celui-ci nécessitait de développer moins de fonctionnalités dédiées. Ce questionnaire en ligne est combiné à des géovisualisations statiques (2D, 3D) et dynamiques (2D, 3D, temps) basées sur les informations spatiales relatives aux éléments de la consultation. Ces géovisualisations sont au cœur de cette recherche. La validation vise à évaluer leur apport vis-à-vis de l'usage traditionnel d'un questionnaire en ligne.

Le questionnaire a été conçu initialement sur papier (cf. Annexe A). Tout au long du questionnaire, le participant peut contribuer et émettre ses opinions sur des cas simulés de consultation citoyenne. Le questionnaire ne compte que sept questions pour que l'expérience ne soit pas trop longue [54]. La première question concerne le niveau d'expérience du participant avec des plateformes cartographiques similaires. Les questions deux à six sont

associées à des cas concrets de consultation citoyenne, aussi appelés scénarios. Les scénarios portent sur des projets d'aménagement urbain. La thématique de l'aménagement urbain a été sélectionnée, car elle interpelle les dimensions spatiale et temporelle facilitant la validation des concepts de cette recherche. Chaque scénario applique des directives de représentation et de simulation spatiotemporelle proposées aux chapitres 1 (cf. Chapitre 1 – Directives de représentations) et 2 (cf. Chapitre 2 – Réalisation d'un mécanisme de simulation spatiotemporelle). La complexité des scénarios augmente au fur et à mesure que le participant avance dans le questionnaire. Cette approche permet au participant de se familiariser progressivement avec les composantes de la plateforme. Le participant peut, au moment d'émettre une opinion vis-à-vis de l'objet de la consultation, évaluer la pertinence des représentations 2D, 3D, temporelles ou non, en répondant à des questions qualitatives et quantitatives. De plus, il peut suggérer des améliorations à apporter aux éléments de la plateforme soit : à l'interface utilisateur (UI), à l'expérience utilisateur (UX) et surtout aux visualisations. La septième question porte sur l'évaluation générale des concepts de la plateforme. Cette évaluation globale contient neuf affirmations pour lesquelles le participant peut indiquer son niveau d'accord ou de désaccord. Ces affirmations concernent, entre autres, la représentation 2D vs 3D, la simulation spatiotemporelle, l'interface utilisateur (UI), l'expérience utilisateur (UX). Ainsi, les réponses obtenues auprès des participants pour l'ensemble du questionnaire permettent de vérifier la validité des directives de représentations élaborées dans le cadre de cette recherche. Ces réponses au questionnaire ainsi que la validation des concepts seront abordées plus en détail au prochain chapitre (cf. Chapitre 4 – Résultats et discussion).

Les scénarios ont été élaborés comme suit : tout d'abord, les éléments que l'on souhaite valider pour ce scénario ont été ciblés. Ensuite, basé sur ces éléments de validation, un contexte de participation citoyenne, inspiré de problématiques réelles de consultation, a été défini. Enfin, pour donner vie à ce scénario, des informations spatiales ont été sélectionnées. Leur sélection est basée à la fois sur la disponibilité des données ainsi que sur leur pertinence pour la validation. Les directives de représentation proposées dans cette recherche ont finalement été appliquées aux informations spatiales. À cet effet, la section à la fin de chaque scénario est



dédiée à l'explication du fonctionnement du scénario ainsi que du rendu visuel des directives choisies au sein du prototype. Bref, les deux prochaines sous-sections abordent dans un premier temps la zone d'étude concernée par le questionnaire, et dans un deuxième temps, les scénarios de consultation citoyenne.

### **3.1.1 Zone à l'étude**

La zone de consultation citoyenne concernée par le questionnaire est la ville de Montréal. Celle-ci met à disposition du public un portail de données ouvertes. Parmi ces données se trouvent des questionnaires de consultation citoyenne pour les années 2013, 2014, et 2016. La disponibilité de ces questionnaires a motivé le choix de Montréal comme zone d'étude compte tenu de l'objectif de ce travail. Des cas concrets et réalistes ont ainsi pu être extraits des questionnaires. Ceux-ci portaient sur la satisfaction des citoyens à l'égard des services offerts par la ville de Montréal. Les questionnaires offraient plusieurs catégories de service (e.g. transport, sécurité, environnement), et chacune de ces catégories contenait un ensemble de sous-questions. Les réponses des citoyens ont été collectées par arrondissement. Nous nous sommes concentrés uniquement sur les arrondissements de Ville-Marie et du Sud-Ouest étant donné que ceux-ci sont associés à des quartiers très différents soit une zone du centre-ville (i.e. Ville-Marie) et une zone résidentielle (i.e. Sud-Ouest). On compte 1342 participants pour le questionnaire de 2013, 1908 pour 2014 et 7615 pour 2016.

### **3.1.2 Scénarios de consultation citoyenne mis en œuvre dans le prototype**

#### **3.1.2.1 Scénario 1 et 2**

Le scénario 2 est une extension du scénario 1. Le scénario 1 sert uniquement à introduire les fonctionnalités de la plateforme au participant afin qu'il puisse se familiariser avec celles-ci. Sur la base de ce 1<sup>er</sup> scénario, le scénario 2 cherche, quant à lui, à valider si une combinaison des représentations 2D, 3D et temps est pertinente pour représenter les informations inhérentes à la consultation citoyenne. De plus, ce scénario cherche à démontrer l'apport du mécanisme

de simulation spatiotemporelle dans un contexte où l'information principale concernée par la consultation est dynamique et représentée en 2D.

Le contexte de consultation choisi pour ce scénario concerne la construction de pistes cyclables. Il s'appuie sur les questionnaires de la Ville de Montréal et sur les questions portant spécifiquement sur ce sujet (e.g. la quantité de pistes cyclables, la qualité de la chaussée). Dans le cadre de la consultation de la Ville de Montréal, les participants ont été sollicités dans la rue. Pour ce scénario, le prototype de cartographie web devrait permettre de mieux comprendre l'impact qu'a eu la construction de pistes cyclables passées sur la construction des pistes actuelles.

Les informations spatiales inhérentes à ce scénario sont : 1) les pistes cyclables construites entre 2012 et 2016 inclusivement (PCP); les pistes cyclables actuelles (ou courantes); 3) les bâtiments 3D; 4) le pourcentage de pistes cyclables; 5) les limites administratives des deux arrondissements à l'étude. Quant aux informations temporelles, la période de temps concernée débute en 2012, se termine en 2016 et le pas de temps est annuel. Les représentations qui ont été appliquées à ces informations sont présentées ci-dessous (à noter que le chemin emprunté pour chaque couche d'information spatiale afin d'aboutir à une directive de représentation spatiale et temporelle est présenté à la Figure 46) :

1. *Les PCP* : Les PCP sont représentées linéairement en 2D à l'aide de la couleur à titre de variable graphique principale. La couleur orange a été sélectionnée, car elle interpelle la thématique de la construction. Le type de changement animé est existentiel cumulatif, i.e. les pistes cyclables apparaissent et disparaissent uniquement si l'année de leur construction est inférieure ou égale à l'année courante. Le chemin **orange** au sein de la Figure 46 correspond à celui des PCP. La représentation des PCP est aussi associée à un graphique à ligne, où chaque nœud de la ligne indique une quantité de PCP correspondant à une année. La couleur de la ligne est également la même que son homologue spatiale dans la scène.

2. *Les pistes cyclables actuelles* : Les pistes cyclables actuelles sont représentées linéairement en 2D à l'aide de la couleur à titre de variable graphique principale. La couleur verte a été sélectionnée. Le chemin **vert** au sein de la Figure 46 correspond à celui des pistes cyclables actuelles. La représentation des pistes cyclables actuelles est aussi associée à un graphique à barres, où chaque barre représente le niveau de satisfaction citoyenne (NSC) pour un arrondissement ainsi que l'année qui lui est associée. Chaque barre possède également la même couleur que son homologue spatiale dans la scène.
3. *Les bâtiments* : Les bâtiments 3D sont représentés par des modèles naturels 3D LOD2 avec deux niveaux d'abstraction : l'un avec texture (photo-réaliste), l'autre sans texture (non photo-réaliste), mais avec une couleur associée (ici grise). Le chemin **bleu** au sein de la Figure 46 correspond à celui des bâtiments.
4. *Le pourcentage des pistes cyclables* : Le pourcentage des pistes cyclables représente, pour chacun des deux arrondissements, la longueur totale des segments des pistes cyclables sur la longueur totale des segments de rues multipliée par 100. Puisque ce pourcentage est associé à un arrondissement, on applique en termes de représentation à la fois la région 2D et la région 3D. Cette double représentation sous forme de région permet d'évaluer l'apport de la représentation 3D vs 2D en termes de perception et de compréhension. La région 2D encode une couleur (respectivement rouge pour un pourcentage de pistes cyclables très faible, orange pour faible, jaune pour moyen, et jaune vert pour élevé et vert pour très élevé). La région 3D encode la même couleur, mais encode en plus la hauteur (respectivement moins haute pour un pourcentage faible et plus haute pour un pourcentage élevé). La hauteur de base correspond à la hauteur du plus haut édifice parmi les deux arrondissements. Cela donne l'impression que la région 3D englobe le quartier. La transparence a été appliquée à la région 3D pour réduire l'occlusion générée avec les autres informations spatiales (e.g. bâtiments, pistes cyclables). Le chemin **rouge** au sein de la Figure 46 correspond à celui du pourcentage des pistes cyclables.

5. *Limites administratives* : Les limites administratives représentent la délimitation des quartiers Ville-Marie et le Sud-Ouest. Les limites sont représentées par des régions 2D encodées en blanc très pâle avec transparence pour ne pas cacher les autres informations présentes sur la même zone (e.g. pistes cyclables, fond de carte). Le chemin **rose** au sein de la Figure 46 correspond à celui des limites administratives.

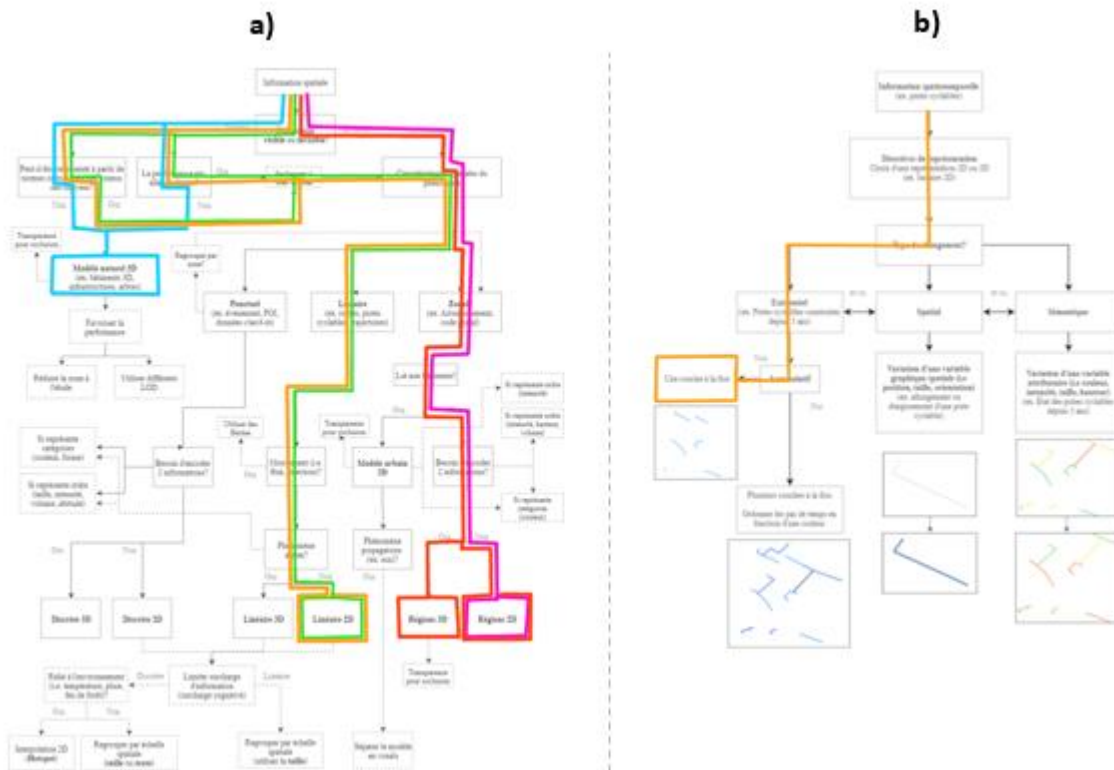


Figure 46 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru, pour chaque couche d'information spatiale utilisée au scénario #2, afin d'aboutir à la sélection d'une directive de représentation. Chaque chemin est représenté à l'aide d'une couleur. Les pistes cyclables actuelles correspondent à la couleur verte ; les PCP à la couleur orange ; les bâtiments 3D à la couleur bleue ; le pourcentage des pistes cyclables à la couleur rouge ; les limites administratives à la couleur mauve ; b) le chemin parcouru pour les pistes cyclables passées afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle.

**Fonctionnement des scénarios et rendu des directives au sein du prototype :** Les scénarios 1 et 2 débutent avec l'introduction des éléments spatiaux constituant la scène. La caméra de la scène Cesium fait un survol des quartiers à l'étude. Après environ 30 secondes d'introduction, l'utilisateur peut à interagir avec la plateforme. Il peut interagir avec la scène et les éléments spatiaux via le requête. Il peut aussi activer / désactiver les couches qu'il ne souhaite pas visualiser. Il peut soit rester en 2D soit basculer en 3D. La vue 2D offre seulement des représentations 2D des éléments spatiaux composant la scène (cf. Figure 47 et Figure 48). Lorsque la vue 3D est active, les bâtiments 3D s'affichent et certains éléments spatiaux, initialement représenter en 2D sont affichés en 3D. Par exemple, le pourcentage de pistes cyclables passe d'une région 2D à une région 3D (cf. Figure 49). Cela permet de comparer les approches de représentation 2D vs 3D. En faisant varier l'axe du temps entre 2012 et 2016, l'utilisateur peut faire varier l'affichage des pistes cyclables suivant leur année de construction.



Figure 47 – Scénario 1 et 2 avec une vue 2D et le style sombre activé pour le fond de carte.

*Cette scène contient le pourcentage de pistes cyclables représenté par la région 2D (respectivement en jaune et en orange pour les quartiers Ville-Marie et le Sud-Ouest de la*

ville de Montréal). Les pistes cyclables pour l'année en cours sont représentées par des lignes vertes, alors que les pistes cyclables pour les années passées sont en orange ;



Figure 48 - Scénario 1 et 2 avec une vue 2D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène contient : les limites administratives représentées par une région 2D blanche avec transparence ; les pistes cyclables pour l'année en cours sont représentées par des lignes vertes, alors que les pistes cyclables pour les années passées sont en orange ; le graphique montre l'évolution des pistes cyclables construites au fil du temps sous forme d'une courbe orange.

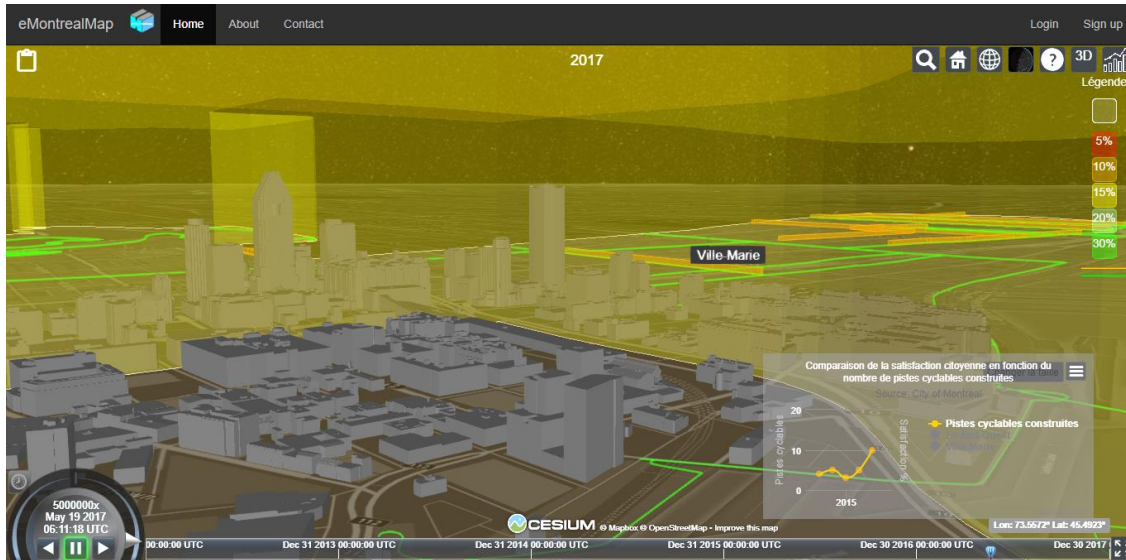


Figure 49 – Scénario 1 et 2 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte.

Cette scène contient : les bâtiments 3D sans texture ; le pourcentage de pistes cyclables représenté par la région 3D (respectivement en jaune et en orange pour les quartiers Ville-Marie et le Sud-Ouest de la ville de Montréal) ; les pistes cyclables pour l'année en cours représentées par des lignes vertes ; les pistes cyclables pour les années passées représentées en orange. Le graphique montre l'évolution des pistes cyclables construites au fil du temps sous forme d'une courbe orange.

### 3.1.2.2 Scénario 3

Ce scénario a pour but de vérifier l'intuitivité de la 3D pour représenter des phénomènes spatiotemporels ainsi que la validité de la simulation spatiotemporelle lorsque des informations spatiotemporelles sont visualisées respectivement en 2D et en 3D. De plus, il vise à déterminer quelles composantes du mécanisme de simulation spatiotemporelle (e.g. animation, graphique) permettent d'établir des corrélations entre les informations 2D et 3D. Le contexte du scénario concerne le niveau de satisfaction citoyenne (NSC) à l'égard de la quantité de pistes cyclables présentes dans leur quartier. Ce scénario est en quelque sorte une extension du scénario précédent, car il réutilise le même sujet de consultation citoyenne à

savoir les pistes cyclables. Toutefois, on cherche ici à évaluer l'impact de la construction d'anciennes pistes cyclables sur le NSC.

Les informations spatiales concernées par ce scénario sont 1) les pistes cyclables construites entre 2012 et 2016 inclusivement; 2) le NSC pour 2013, 2014 et 2016; 3) les bâtiments 3D; 4) les pistes cyclables actuelles; 5) les limites administratives. Le NSC à l'égard de la quantité de pistes cyclables était une information disponible au sein des questionnaires de consultation de la Ville de Montréal. Les données inhérentes à cette variable ont été récupérées et compilées avec Excel. Une fois ces données compilées, elles ont été converties dans un format lisible pour la plateforme (i.e. GeoJSON qui est un format de données spatiales). Quant aux informations temporelles, la période de temps concernée débute en 2012, se termine en 2016 et le pas de temps est annuel. Les directives de représentation qui ont été appliquées aux pistes cyclables, aux bâtiments 3D et aux limites administratives sont les mêmes que celles appliquées dans le cadre du scénario #2. Les directives appliquées au NSC sont présentées ici :

- *Le NSC* : Par défaut, le NSC représente un petit échantillon des citoyens vivants dans les deux arrondissements à l'étude. Par conséquent, on peut lier le NSC aux bâtiments 3D LOD2 appartenant à ces deux quartiers. Dans ce contexte, la directive de représentation choisie pour le NSC est le modèle urbain (i.e. les bâtiments 3D). Les bâtiments encodent, selon leur NSC respectif, une des cinq couleurs suivantes : rouge pour très insatisfait, rose pour insatisfait, mauve pour ni satisfait ni insatisfait, bleu pâle pour satisfait et bleu pour très satisfait. Les teintes de « rouge à bleu » ont été utilisées, car elles apportent plus de contraste avec le fond de carte utilisé au sein de la plateforme [51]. La variation de la couleur est animée par un changement de type sémantique, i.e. la couleur varie en fonction de la valeur du NSC attribuée à l'année courante. La représentation du NSC est aussi associée à un graphique à barres, où chaque barre représente le NSC pour un arrondissement ainsi que l'année qui lui est associée. Chaque barre possède également la même couleur que son homologue



spatiale dans la scène. Le chemin **bleu pâle** au sein de la Figure 50 correspond à celui du NSC.

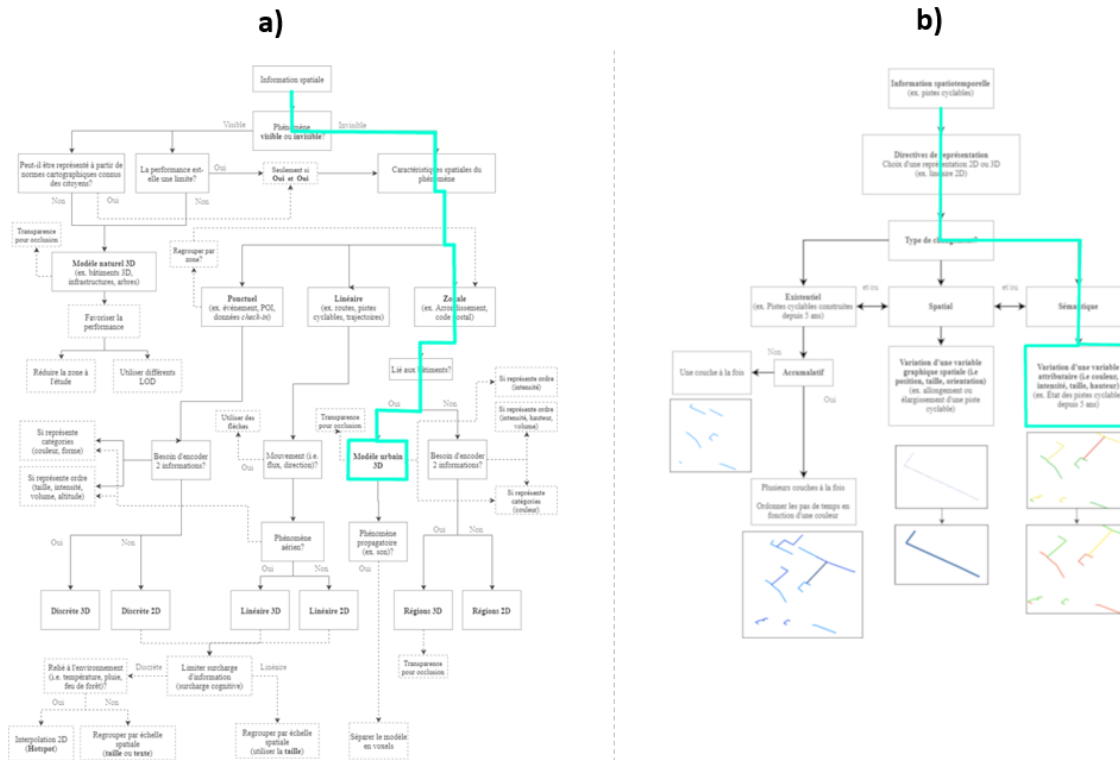


Figure 50 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru (en bleu pâle) pour le NSC du scénario #3, afin d'aboutir à une sélection d'une directive de représentation. b) montre le chemin parcouru pour le NSC afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle.

**Fonctionnement du scénario et rendu des directives au sein du prototype :** Le scénario 3 débute avec l'introduction des éléments spatiaux constituant la scène. La caméra de la scène Cesium fait un survol des pistes cyclables ayant été construites au cours des dernières années. Après environ 30 secondes d'introduction, l'utilisateur peut interagir avec la plateforme. Le NSC est représenté sous forme d'un modèle urbain 3D (cf. Figure 51). La couleur est utilisée pour encoder cette information. En interagissant avec l'axe du temps, l'utilisateur peut faire afficher les pistes cyclables ayant été construites entre 2012 et 2016. Il peut aussi voir

l'évolution du NSC entre 2013 et 2016. Dans ce cas, une telle évolution se caractérise par un changement de couleur au niveau des bâtiments 3D (cf. Figure 52).



Figure 51 - Scénario 3 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène contient : les bâtiments 3D sans texture ; le NSC représenté par le modèle urbain encodant une couleur (respectivement en rose et en bleu pâle pour les quartiers Ville-Marie et le Sud-Ouest de la ville de Montréal) ; les pistes cyclables pour les années passées représentées en orange. Le graphique montre 1) l'évolution au fil du temps des pistes cyclables sous forme d'une courbe orange et 2) l'évolution au fil du temps du NSC.

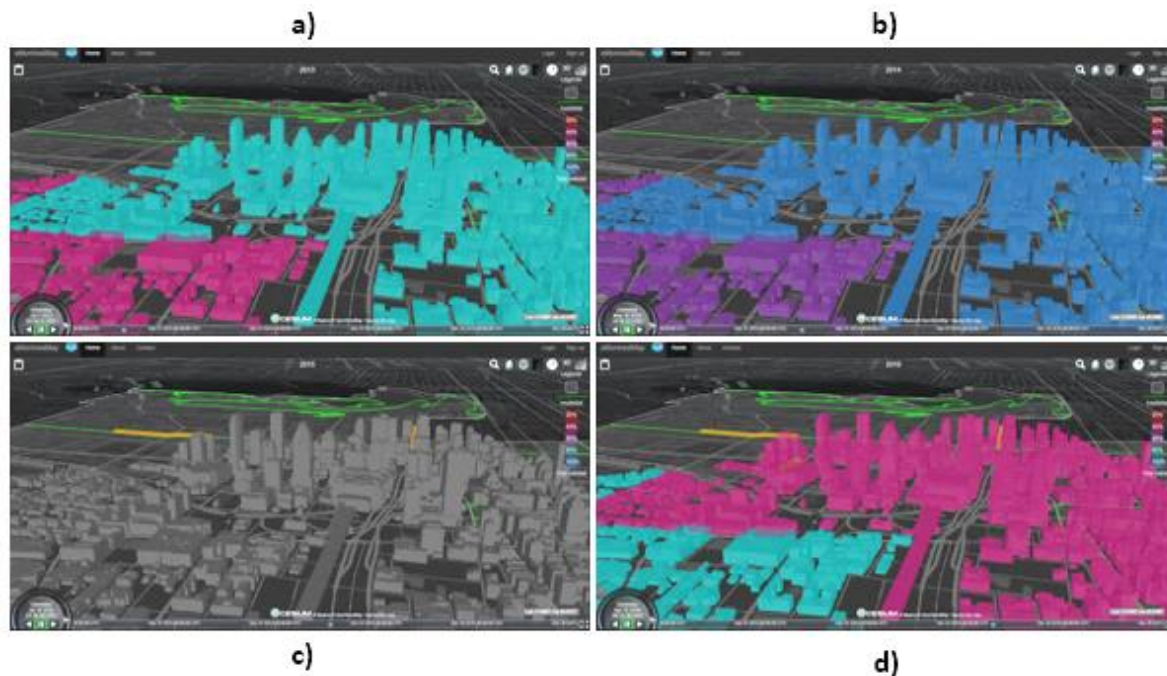


Figure 52 - D'une manière générale, cette grande figure illustre le scénario 3 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Il y a quatre sous-figures annotées d'une lettre et chacune correspond au NSC à un moment donné dans le temps pour les quartiers, respectivement, de Ville-Marie et du Sud-Ouest de Montréal. Le NSC est représenté par un modèle urbain encodant une couleur pour chacun des arrondissements. Une couleur rose signifie un NSC insatisfaisant, mauve pour indifférent, bleu pâle pour satisfait et bleu pour très satisfait. La figure a) montre le NSC en 2013, Ville-Marie est le quartier ayant un NSC en bleu pâle et le Sud-Ouest est le quartier ayant un NSC en rose ; la figure b) montre le NSC en 2014, Ville-Marie est le quartier ayant un NSC en bleu et le Sud-Ouest est le quartier ayant un NSC en mauve ; la figure c) montre qu'il y a une absence de données pour l'année 2015, ainsi les bâtiments ont leur couleur par défaut (le gris) ; la figure d) montre le NSC en 2016, Ville-Marie est le quartier ayant un NSC en rose et le Sud-Ouest est le quartier ayant un NSC en bleu pâle ; les pistes cyclables actuelles sont représentées par des lignes vertes ; alors que les pistes cyclables pour les années passées sont en orange ; les limites administratives des deux arrondissements sont représentées par une région 2D blanche transparente.

### 3.1.2.3 Scénario 4

Au travers de ce scénario, on cherche à vérifier l'adéquation du mécanisme de simulation spatiotemporelle pour analyser les impacts des choix réalisés pendant une consultation. De plus, on cherche à vérifier l'apport de la 3D (i.e. bâtiments 3D) au sein d'une visualisation d'informations spatiotemporelles 2D. Ainsi, ce scénario met en contexte des propositions futures de pistes cyclables. Le participant doit choisir les propositions de futures pistes cyclables auxquelles il adhère et qu'il souhaite voir réaliser. Le déroulement du scénario prévoit une cohérence et continuité dans l'extension du réseau de pistes cyclables. Ainsi, la construction d'une piste et l'extension d'un réseau de pistes dans une direction donnée peuvent empêcher la construction future de pistes dans une autre direction. Les choix ont donc des impacts et le participant peut être informé de tels impacts à l'aide de la simulation spatiotemporelle. Contrairement au scénario 4 qui se concentre sur les pistes cyclables passées, le scénario 5 se concentre sur les pistes cyclables futures.

Les informations spatiales concernées par ce scénario sont 1) les PCF pour 2018, 2019 et 2020; 2) les bâtiments 3D; 3) les pistes cyclables actuelles; 4) les limites administratives. Quant aux informations temporelles, la période de temps concernée débute en 2018, se termine en 2020 et le pas de temps est annuel. Les directives de représentation qui ont été appliquées aux pistes cyclables actuelles, aux bâtiments 3D et aux limites administratives sont les mêmes que celles appliquées dans le cadre des scénarios précédents. Les directives appliquées aux PCF sont présentées ici :

- *Les PCF* : Les pistes cyclables futures sont représentées linéairement en 2D à l'aide de la couleur à titre de variable graphique principale. Une teinte de bleu a été attribuée pour chaque année de construction. Le type de changement animé est existentiel cumulatif, car les pistes cyclables apparaissent et disparaissent uniquement si l'année de leur construction est inférieure ou égale à l'année sélectionnée au travers de l'axe de temps. La représentation des PCF est aussi associée à un graphique à barres, où chaque barre indique la quantité de pistes cyclables construites pour cette année. Une couleur est utilisée pour indiquer l'année de la barre. Cette couleur est également la

même que son homologue spatiale dans la scène. Le chemin **mauve** au sein de la Figure 53 correspond à celui des PCF.

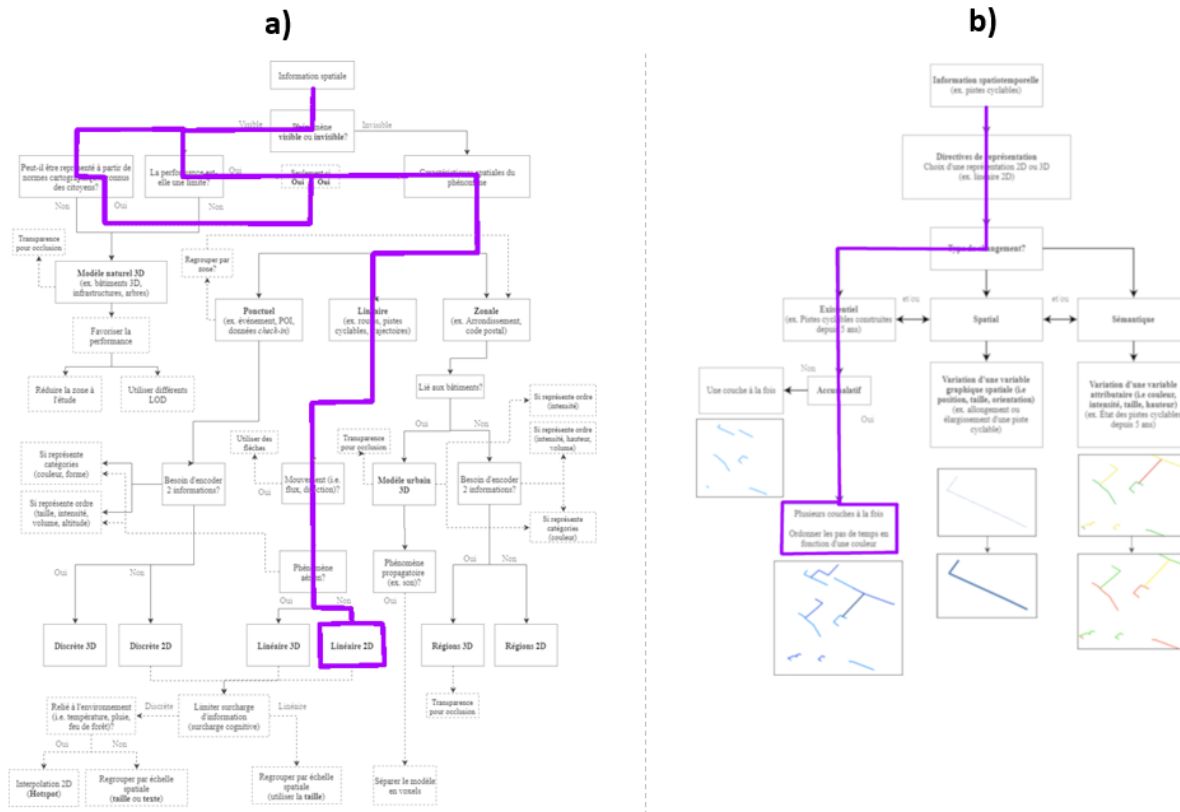


Figure 53 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru (en mauve) pour les PCF du scénario #4, afin d'aboutir à une sélection d'une directive de représentation. b) montre le chemin parcouru pour les PCF afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle.

**Fonctionnement du scénario et rendu des directives au sein du prototype :** La caméra de la scène Cesium fait un survol des pistes cyclables futures (PCF) pour l'année 2018. Après environ une minute d'introduction, l'utilisateur peut interagir avec la plateforme. Les PCF proposées pour les années 2018, 2019 et 2020 sont représentées linéairement en 2D. Elles encodent un dégradé de bleu pour chaque année (respectivement bleu foncé pour 2020, bleu pour 2019 et bleu pâle pour 2018). L'utilisateur peut soit rester en 2D soit basculer en 3D. Lorsque la vue 3D est active, les bâtiments 3D s'affichent (cf. Figure 54 et Figure 55). La

fonction d'activation de la 3D permet à l'utilisateur d'évaluer l'apport de la 3D (i.e. bâtiments 3D) dans la scène proposée au moment de visualiser les pistes cyclables. En interagissant avec l'axe du temps, l'utilisateur peut afficher les pistes cyclables qui potentiellement pourront être construites entre 2018 et 2020. Il peut aussi sélectionner les pistes cyclables qu'il souhaite voir construire dans le futur. Pour ce faire, il utilise les commandes « ctrl + clique ».

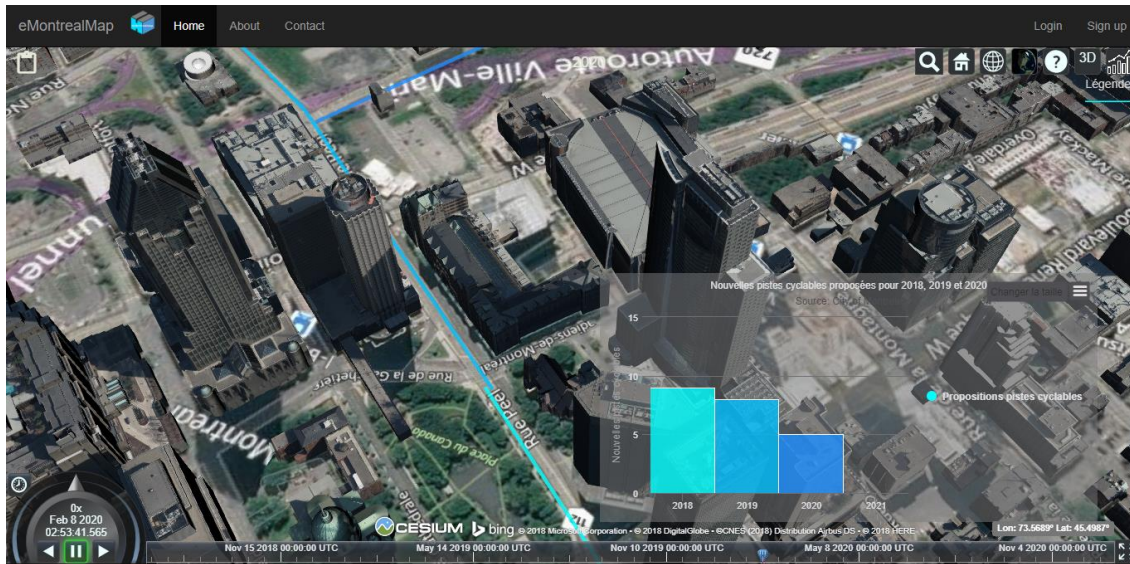


Figure 54 – Scénario 4 avec une vue 3D et le style réaliste activé pour le fond de carte. Cette image montre les éléments dans la scène. Les PCF sont représentées par des lignes 2D encodant un dégradé de bleu (respectivement bleu pâle, turquoise et bleu pour 2018, 2019 et 2020). Le graphique montre, à l'aide de colonnes, le nombre de PCF pour chaque année. La couleur d'une barre représente la même couleur que son homologue spatial dans la scène.



Figure 55 - Scénario 4 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Cette scène montre les PCF représentées par des lignes 2D encodant un dégradé de bleu (respectivement bleu pâle, turquoise et bleu pour 2018, 2019 et 2020. Le graphique montre, à l'aide de colonnes, le nombre de PCF pour chaque année. La couleur d'une barre représente la même couleur que son homologue spatial dans la scène.

### 3.1.2.4 Scénario 5

Ce scénario cherche, tout comme le scénario 4, à vérifier l'adéquation du mécanisme de simulation spatiotemporelle pour analyser les impacts des choix réalisés pendant une consultation. Néanmoins, la différence avec le scénario 4 est que l'on cherche à vérifier l'apport de la 3D (i.e. bâtiments 3D) lorsque des informations spatiotemporelles 3D sont visualisées. Le sujet de la consultation concerne la proposition de futurs bâtiments ainsi que l'impact de leur construction sur la densité de population. Bien qu'il y ait une infinité de possibilités en matière d'impacts (e.g. indice espace vert, augmentation des îlots de chaleurs, augmentation des gaz à effet de serre, etc.) engendrés par la construction de nouveaux édifices, la densité de population a été choisie dans le cadre de cette recherche. En effet, le phénomène de densification des milieux urbains s'intensifie de plus en plus dans les grandes villes. Au Canada par exemple, les villes de Toronto et Vancouver subissent ce phénomène depuis déjà

quelques années. Il n'est pas rare que des édifices à logements soient construits dans des secteurs résidentiels. La construction de nouveaux édifices dans des secteurs résidentiels peut affecter le paysage urbain de ces secteurs. De plus, une augmentation de la densité de population dans certains secteurs peut causer différents problèmes tels qu'une surcharge des services de transports publics. À Toronto et Vancouver, le phénomène est accentué par des investissements étrangers. Bien que ce phénomène soit présent et s'intensifie, les citoyens ne disposent d'aucun moyen pour visualiser l'impact de la construction d'édifices dans le futur.

Les bâtiments proposés sont divisés en quatre secteurs délimités par les quartiers à l'étude. Ces secteurs ont été choisis puisque chacun d'eux est caractérisé par une densité de population différente. Par exemple, le secteur 1 est situé au centre-ville (densité très forte), le secteur 2 est une zone industrielle (densité faible), le secteur 3 (densité moyenne) est résidentiel et le secteur 4 est à mi-chemin entre un secteur au centre-ville et un secteur résidentiel (densité forte). On considère que la construction de nouveaux édifices sera perçue différemment en fonction du quartier à l'étude. Par exemple, il peut s'avérer normal de construire de nouveaux gratte-ciels au centre-ville de Montréal. En revanche, la même chose ne s'applique sûrement pas avec un secteur résidentiel. Ainsi, des choix de bâtiments différents interviennent selon le secteur considéré. Tout au long du scénario, le participant doit choisir les propositions de futurs bâtiments auxquelles il adhère et qu'il souhaite voir réaliser. La construction d'un édifice spécifique va avoir un impact sur la densité de population du secteur concerné. En tout temps, le participant peut vérifier l'impact de ses choix à l'aide de la simulation spatiotemporelle. Les informations spatiales concernées par ce scénario sont 1) les futurs bâtiments 3D construits (CNB) en 2020, 2025 et 2030 ; 2) la densité de population (DP) dans les secteurs en 2020, 2025 et 2030 ; 3) les bâtiments 3D actuels; 4) la délimitation des quatre secteurs. Quant aux informations temporelles, la période de temps concernée débute en 2020, se termine en 2030 et le pas de temps est aux cinq ans. Les directives de représentation appliquées pour ces informations sont présentées ici :

- *Les CNB* : Les CNB sont représentés par des modèles urbains 3D LOD2 et utilise la couleur pour encoder l'année de la construction. La couleur bleue a été sélectionnée et



un dégradé de bleu a été attribué pour chaque année de construction. Chaque dégradé de bleu offre un bon contraste avec les fonds de carte, c'est pourquoi ils ont été choisis. La transparence a été utilisée pour réduire l'occlusion engendrée par l'apparition d'un bâtiment nouveau sur un autre. Le type de changement animé est existentiel cumulatif, car les bâtiments apparaissent et disparaissent uniquement si l'année de leur construction est inférieure ou égale à l'année sélectionnée via l'axe de temps. Le chemin **bleu** au sein de la Figure 56 correspond à celui de la sélection des directives de représentation pour les CNB.

- *Secteurs* : Les secteurs délimitent circulairement les bâtiments futurs pour chaque année. Ils sont représentés à l'aide de régions 2D. La couleur blanche est utilisée conjointement avec la transparence. Le type de changement est spatial, car les secteurs ajustent leur diamètre en fonction de l'expansion générée par la construction de nouveaux bâtiments. Le chemin **gris foncé** au sein de la Figure 56 correspond à celui de la sélection des directives de représentation des secteurs.
- *La DP* : La DP est délimitée par les secteurs, ainsi elle possède une forme circulaire. Dans ce contexte, la région 3D a été utilisée pour encoder deux informations grâce à la couleur et au volume. La couleur correspond à la valeur de densité de population. Il y a cinq choix de couleur possibles : rouge pour une densité très forte; orange pour une densité forte ; jaune pour une densité moyenne ; verte pour une densité faible et verte foncée pour une densité très faible. Le volume représente la délimitation du secteur, donc la forme résultante est une demi-sphère colorée englobant les bâtiments 3D. Le type de changement animé est à la fois spatial et sémantique. Il est spatial, car le volume s'ajuste avec l'expansion du secteur. Il est sémantique, car la couleur de la demi-sphère s'ajuste en fonction du niveau de densité de population. La représentation de la DP est aussi associée à un graphique à barres, où chaque barre indique le niveau de DP pour chaque secteur pour une année. Une couleur est associée à chaque barre indiquant son niveau de DP pour une année. Cette couleur est également la même que

son homologue spatiale dans la scène. Le chemin **vert** au sein de la Figure 56 correspond à celui de la sélection des directives de représentation de la DP.

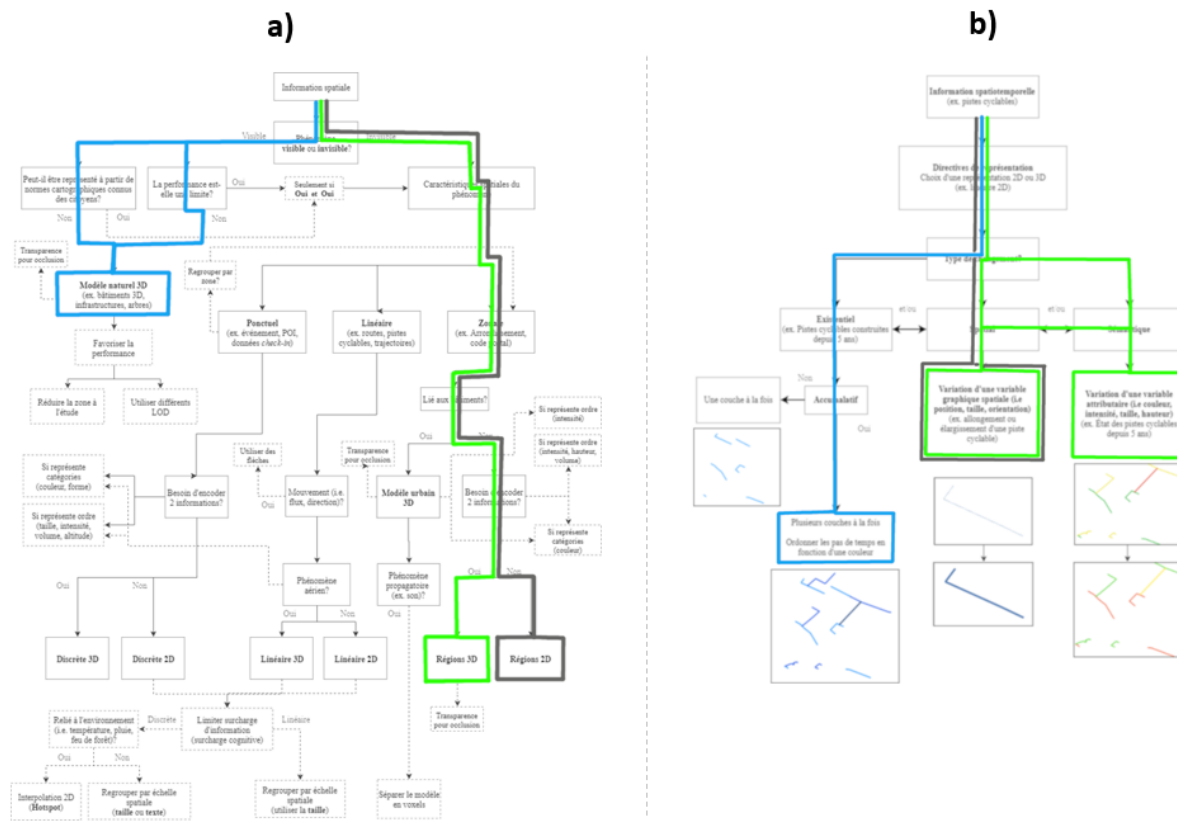


Figure 56 - Cette figure montre : a) le chemin parcouru, pour chaque couche d'information spatiale utilisée au scénario #5, afin d'aboutir à une sélection d'une directive de représentation. Chaque chemin est représenté à l'aide d'une couleur. Les CNB correspondent à la couleur bleue ; les secteurs à la couleur gris foncé ; la DP à la couleur verte ; b) le chemin parcouru pour les CNB, les secteurs et la DP afin d'aboutir à une représentation spatiotemporelle.

**Fonctionnement du scénario et rendu des directives au sein du prototype :** La caméra de la scène Cesium fait un survol des secteurs à l'étude. Après environ une minute d'introduction, l'utilisateur peut interagir avec la scène. En interagissant avec l'axe du temps, l'utilisateur peut afficher la construction de nouveaux bâtiments (CNB) en 2020, 2025 et 2030. Ces derniers

encodent un dégradé de bleu correspondant à leur période de construction. Les valeurs possibles en termes de dégradé de bleu sont bleu pâle pour 2020, turquoise pour 2025 et bleues pour 2030 (cf. Figure 57). La densité de population (DP) est représentée par des régions 3D correspondant à des demi-sphères. Chaque demi-sphère encode une couleur correspondant à un niveau de DP. Les couleurs possibles avec leur niveau de DP respectif sont : rouge pour fortement densifié; orange pour plutôt densifié; jaune pour moyennement densifié; vert pâle pour peu densifié; et vert foncé pour très peu densifié (cf. Figure 58). Le volume et la couleur de la demi-sphère varient au fil du temps en fonction de la DP. D'une part, le changement de volume correspond à un agrandissement ou à une diminution des secteurs ciblés en fonction des nouvelles constructions. D'autre part, le changement de couleur signifie un changement de DP manifesté à travers l'ajout ou la suppression de bâtiments. À cet effet, l'utilisateur peut sélectionner les bâtiments qu'il juge inappropriés et qu'il ne souhaite pas voir construits dans le futur (cf. Figure 59). Pour ce faire, il utilise les commandes « ctrl + clique ».

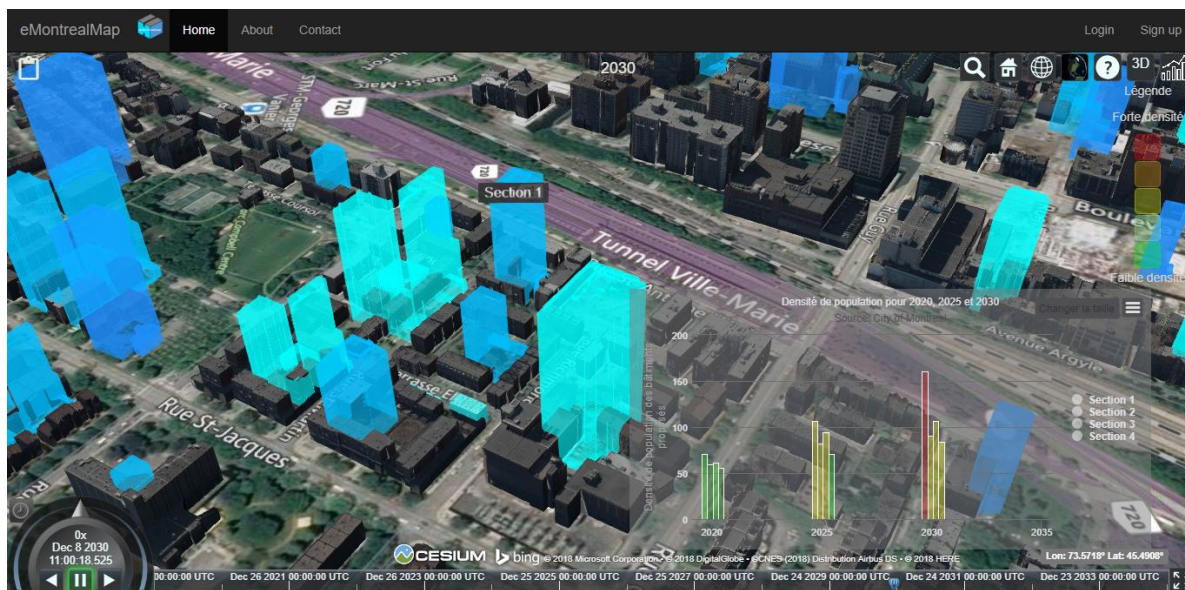


Figure 57 –D’une manière générale, cette figure représente deux perspectives différentes pour la même scène du scénario 5. Dans cette figure, la vue 3D et le style réaliste pour le fond de carte sont activés. Cette scène contient : les bâtiments 3D avec texture ; la CNB est représenté par des modèles urbains (respectivement bleu pâle pour 2020, turquoise pour 2025 et bleu pour 2030) ; les colonnes (une colonne pour chaque secteur) du graphique

encodent une couleur correspondant à une valeur de DP (respectivement rouge pour fortement densifié, orange pour plutôt densifié, jaune pour moyennement densifié, vert pâle pour peu densifié et vert foncé pour très peu densité).

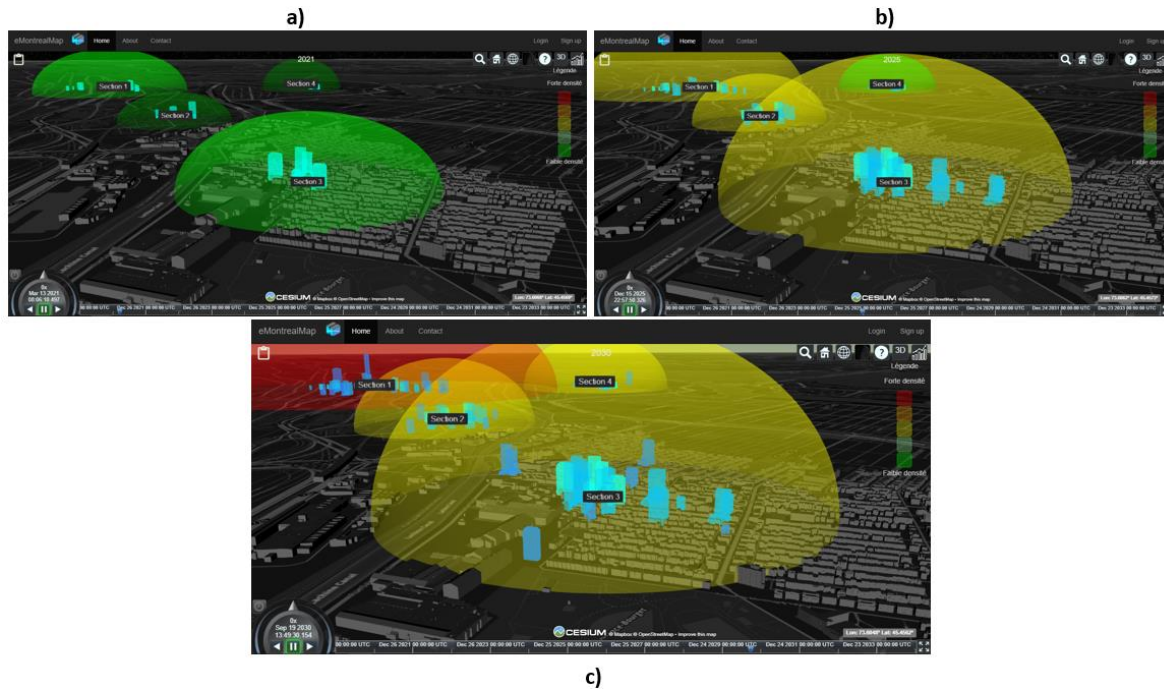


Figure 58 - D'une manière générale, cette figure illustre le scénario 5 avec une vue 3D et le style sombre activé pour le fond de carte. Il y a trois sous-figures annotées d'une lettre et chacune illustre la CNB et la DP à un moment dans le temps. La CNB est représentée par un modèle urbain encodant un dégradé de bleu pour chacune des périodes (respectivement bleu pâle, turquoise, et bleu pour 2020, 2025 et 2030) ; la DP est représentée par des régions 3D en forme de demi-sphère. Chacune de ces demi-sphères encode une couleur correspondant à une valeur de DP. Les couleurs possibles pour la DP sont (rouge pour fortement densifié, orange pour plutôt densifié, jaune pour moyennement densifié, vert pâle pour peu densifié et vert foncé pour très peu densité) ; la figure a) montre la CNB et la DP pour 2020 ; la figure b) pour 2025 et la figure c) pour 2030.

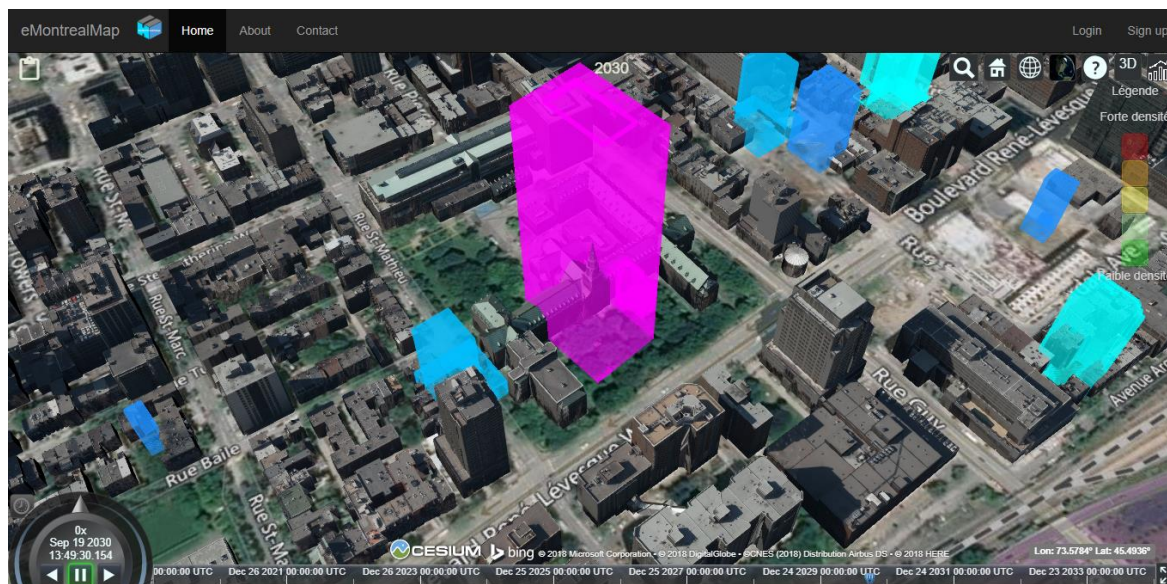


Figure 59 - Scénario 5 avec une vue 3D et le style réaliste activé pour le fond de carte. Cette scène contient : les bâtiments 3D avec texture ; la CNB est représentée par des modèles urbains (respectivement bleu pâle pour 2020, turquoise pour 2025 et bleu pour 2030) ; le bâtiment illuminé en fuchsia correspond à un bâtiment inapproprié qui a été sélectionné par l'utilisateur ; Architecture logicielle et composants clés du prototype

## 3.2 Architecture logicielle et composants clés

Cette section porte sur les aspects techniques de cette recherche. Elle décrit l'architecture logicielle du prototype de plateforme développée. L'architecture est de type 3-tiers web et est composée d'un serveur (back-end) et d'un client (front-end) (cf. Figure 60).

### 3.2.1 Le côté serveur (back-end)

Le côté serveur traite les demandes faites par le client, obtient l'information nécessaire et les renvoie ensuite sous forme de réponses au client. Le serveur a été développé avec Node.js (v7.10.0) et le module Express (v4.4.4) et MongoDB (v3.4.9) comme base de données. Express est un *framework* d'application Web minimal et flexible fournissant un ensemble de fonctionnalités robustes pour les applications Web et mobiles (Express, 2017). Ces trois

technologies fonctionnent parfaitement ensemble entre autres, parce que leur structure commune est *JavaScript Object Notation* (JSON).

Au sein de la structure logicielle, Node.js est un langage côté serveur. Node.js a été choisi versus d'autres langages côté serveur tel que Java, PHP ou .Net, principalement en raison de sa convivialité et de sa capacité à écrire moins et à faire plus. D'ailleurs, il est de plus en plus populaire puisqu'il permet d'écrire du JavaScript côté serveur. Dans ce contexte, un seul et même langage de programmation peut être utilisé aussi bien pour le côté client que pour le côté serveur : le JavaScript. Au sein du prototype, le module Express de Node.js a été choisi pour mettre en place un serveur web. Ensemble, Express et Node.js sont chargés du stockage et de la récupération depuis la base de données des informations de consultation (e.g. commentaires). Ensuite, les couches spatiales sont envoyées à l'interface cliente. Au sein du serveur web, les couches spatiales sont stockées en fichiers GeoJSON (e.g. les pistes cyclables, les constructions de rues) et en format JSON 3D nommé le glTF (i.e. les bâtiments 3D).

MongoDB a été utilisée avec le module Mongoose (v4.12.2) pour la base de données ([www.mongoosejs.com](http://www.mongoosejs.com)). Mongoose est le module nécessaire à Node.js pour communiquer avec la base de données MongoDB. MongoDB est une base de données NoSQL et orientée document. Sa notation est donc basée sur le JSON. MongoDB a été préférée aux autres bases de données NoSQL telles qu'OrientDB ou CouchDB notamment à cause de sa grande communauté d'utilisateurs ainsi que de la qualité de la documentation et des exemples disponibles. MongoDB a été préférée aux bases de données relationnelles comme PostGIS et NoSQL principalement en raison de sa flexibilité. En effet, il est facile d'apporter des modifications à un document stocké dans une base de données NoSQL. Comme ce sont les informations relatives à la participation des utilisateurs (e.g. choix réalisés, opinions...), cela ne nécessitait pas une base de données SQL pour effectuer le stockage de ces informations. De plus, bien que MongoDB ne soit pas aussi performant que PostGIS en ce qui concerne les fonctionnalités spatiales, la plateforme ciblée n'avait pas particulièrement besoin de ces fonctionnalités.

### 3.2.2 Le côté client (front-end)

Concernant le côté client, Cesium.js, 3DCityDB et Highchart ont été utilisés. Cesium.js (v1.39) a été utilisé comme principale technologie frontale pour rendre des informations spatiotemporelles 3D. Cesium.js est un globe virtuel open source pour créer des visualisations dynamiques 2D et 3D (Cesium, 2017). Il dispose d'une API (*Application Programming Language*) écrite en JavaScript et celle-ci est conviviale. La documentation de l'API de Cesium.js est également claire et bien écrite. 3DCityDB-Web-Map-Client (v1.4.0) a été utilisé pour la gestion des tuiles CityGML des bâtiments 3D au sein de Cesium.js. Dans ce sens, il gère l'affichage des bâtiments 3D selon la vue et le niveau de zoom de la caméra de Cesium.js. La librairie JavaScript Highcharts a été utilisée pour gérer les graphiques (e.g. histogramme, *line plot*, *scatter plot*) au sein du prototype. Highcharts est une bibliothèque graphique puissante et elle a été largement développée depuis sa création en 2009 (Highcharts, 2017). Highcharts supporte actuellement de nombreux types de graphiques tels que les graphiques à lignes, *spline*, *area*, *areaspline*, colonnes, barres, camemberts, *scatter*, etc. Il comprend une documentation robuste, une réactivité avancée et un support de pointe. Highcharts est gratuit et à des fins non commerciales, ce qui est idéal pour un projet axé sur la recherche (Highcharts, 2017).

Le reste du prototype a été développé en utilisant les langages web classiques tels que HTML5, JavaScript et CSS. Les librairies JavaScript utilisées sont Bootstrap (v3.3.7) et JQuery (v3.2.1). D'une part, Bootstrap est une librairie *front-end* très populaire qui fournit les fonctionnalités nécessaires pour construire rapidement un prototype. Bootstrap est intentionnellement destiné à se concentrer sur les composants d'interface (Bootstrap, 2017). Leur système de grille est parmi les caractéristiques les plus populaires. D'autre part, JQuery est une extension de JavaScript permettant d'écrire du code plus rapidement.

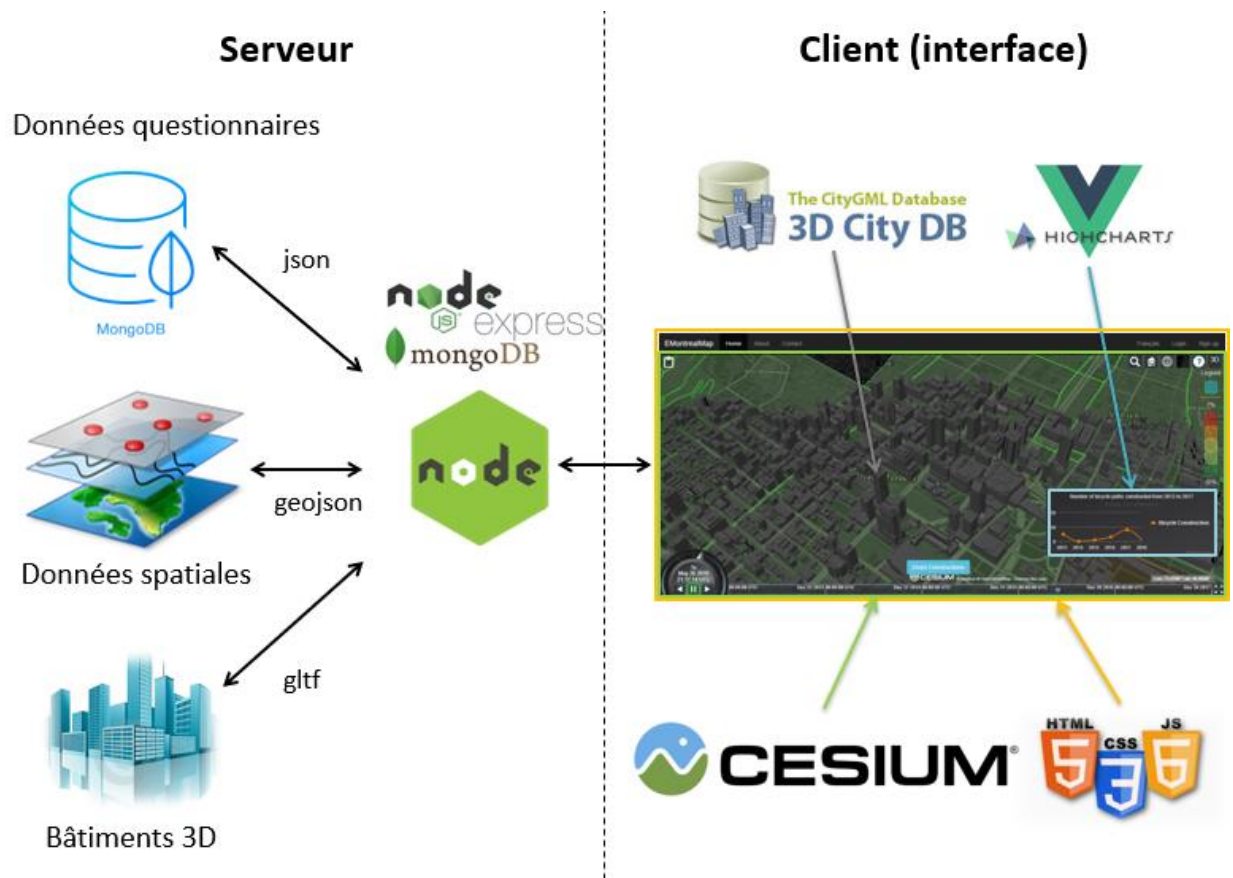


Figure 60 – Architecture logicielle du prototype de cartographie web de participation citoyenne.

### 3.2.3 Composantes architecturales clés

Les composantes architecturales clés concernent les modules d'importance de l'architecture. Il y a deux composantes clés au sein de l'architecture. La composante 3D et la composante spatiotemporelle. Les prochaines sections décrivent la méthodologie employée pour construire ces deux composantes.

#### 3.2.3.1 La composante 3D

La composante 3D concerne les bâtiments du prototype. Encore aujourd'hui, rendre plusieurs milliers de bâtiments sur le web avec un bon niveau de performance et de fluidité est un défi.



Au moment d'effectuer la conception du prototype, les technologies gratuites pour rendre des bâtiments 3D sur le web étaient limitées. Bien que les tuiles 3D de Cesium offrent des performances très intéressantes, elles n'étaient pas au point au moment de sélectionner une technologie de rendu des bâtiments. De plus, les outils pour générer des tuiles 3D étaient toujours à un niveau très primitif. Ainsi, l'utilisation des tuiles 3D de Cesium n'était pas possible sans investir trop de temps. Dans ce contexte, seul 3DCityDB-importer-exporter offrait une alternative aux tuiles 3D de Cesium [57]. 3DCityDB-importer-exporter importe des données au format CityGML dans une base de données PostGIS et exporte ces données dans un format tuilé permettant leur rendu dans Cesium. 3DCityDB-importer-exporter (v3.3.1) a donc été choisi pour effectuer le rendu 3D des bâtiments dans le prototype.

Les bâtiments 3D proviennent du portail de données ouvertes de la Ville de Montréal. Les données disponibles sont des bâtiments datant de 2013 au format CityGML avec un niveau de détails 2 (LoD2) et texture. Ces données ont été importées dans une base de données PostGIS à l'aide de 3DCityDB. Le modèle 3D a ensuite été exporté et tuilé vers des fichiers KML et glTF. Deux modèles ont été exportés, un sans texture et l'autre avec texture. Selon [25], offrir différents styles de visualisation peut faciliter la reconnaissance d'information selon le contexte. Une visualisation avec texture offre plus de détails et est souvent nécessaire pour une meilleure acceptation auprès du public [16]. Néanmoins, cette visualisation offre moins de contraste avec les informations à visualiser puisque les couleurs peuvent s'entremêler [121]. De plus, les modèles avec texture sont plus exigeants d'un point de vue de la performance d'une application web. D'un autre côté, une visualisation sans texture fait ressortir les couleurs des visualisations tout en favorisant la performance [121]. Ainsi, le modèle sans texture est utilisé avec un fond de carte sombre de Mapbox<sup>13</sup>. Le modèle avec texture est utilisé avec un fond de carte Bing<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup> Mapbox : Est une API pour créer des cartographies web interactives ([www.mapbox.com](http://www.mapbox.com)).

<sup>14</sup> Bing : Services web offerts par Microsoft, plusieurs imageries en format WMS sont disponibles ([www.bing.com/maps](http://www.bing.com/maps)).

### 3.2.3.2 La composante spatiotemporelle

La présente composante réfère au développement du mécanisme de simulation spatiotemporelle conçu au *Chapitre 2 – Conception d’un mécanisme de simulation spatiotemporelle*. Le mécanisme comprend trois sous-composantes : l’animation de la scène 3D, l’axe de temps et les graphiques. La scène 3D contient les animations des couches spatiotemporelles. L’axe de temps comprend le réglage de l’animation et du temps, donc le fait de pouvoir reculer et avancer le temps, le réglage de la vitesse, la sélection d’une date ou d’une période, etc. Les graphiques intègrent les informations des couches spatiotemporelles et s’ajustent en fonction du temps.

La gestion du temps dans Cesium passe par une horloge et un axe de temps. Ces deux composantes viennent par défaut avec l’API de Cesium. L’horloge gère tout ce qui se rattache à l’animation de l’axe de temps : l’heure courante, reculer et avancer le temps, modifier la vitesse de déroulement du temps, mettre sur pause, jouer ou arrêter. L’axe de temps lui se charge d’afficher la période désirée avec la date de début et la date de fin. Il lance également des événements lorsque l’état temporel change. Ainsi, compte tenu de ces fonctionnalités déjà disponibles dans Cesium, il n’est pas nécessaire de développer à nouveau un axe de temps et une composante pour gérer les animations. Le travail restant consiste à lier les couches spatiotemporelles aux événements de changement de temps.

Concernant les graphiques, ils sont complémentaires aux couches spatiotemporelles visualisées dans la scène. Le changement est orchestré à partir de l’axe de temps. Celui-ci lance un événement lorsqu’il change d’état temporel. Le graphique et les couches spatiotemporelles se mettent à jour en fonction de ces événements. Les couches spatiotemporelles concernent les constructions de pistes cyclables, la construction de bâtiments et le niveau de satisfaction des citoyens de la ville Montréal en lien avec les services offerts par la ville (par exemple, les pistes cyclables). En ce qui concerne les couches de construction, la Ville de Montréal nous a donné accès aux constructions de rues actuelles et antérieures jusqu’à l’année 1989.

### 3.3 Interface de visualisation et d'interaction

L'interface principale du prototype intitulée EMontrealMap est proposée à la Figure 61. L'interface est divisée en quatre zones. Le questionnaire associé à la consultation citoyenne se trouve à gauche. L'utilisateur peut ouvrir ou fermer le questionnaire grâce à un bouton disponible dans la partie Nord-Ouest de la scène sous l'entête. En haut de la page se trouve l'entête comprenant les boutons « *home, about, contact et login* ». Au centre se trouve la scène 2D/3D où les informations spatiales sont visualisées. Au bas se trouvent l'horloge (à gauche) et l'axe de temps correspondant aux mécanismes de simulation spatiotemporelle. Les paragraphes suivants décrivent les fonctionnalités correspondant à l'interface développée.

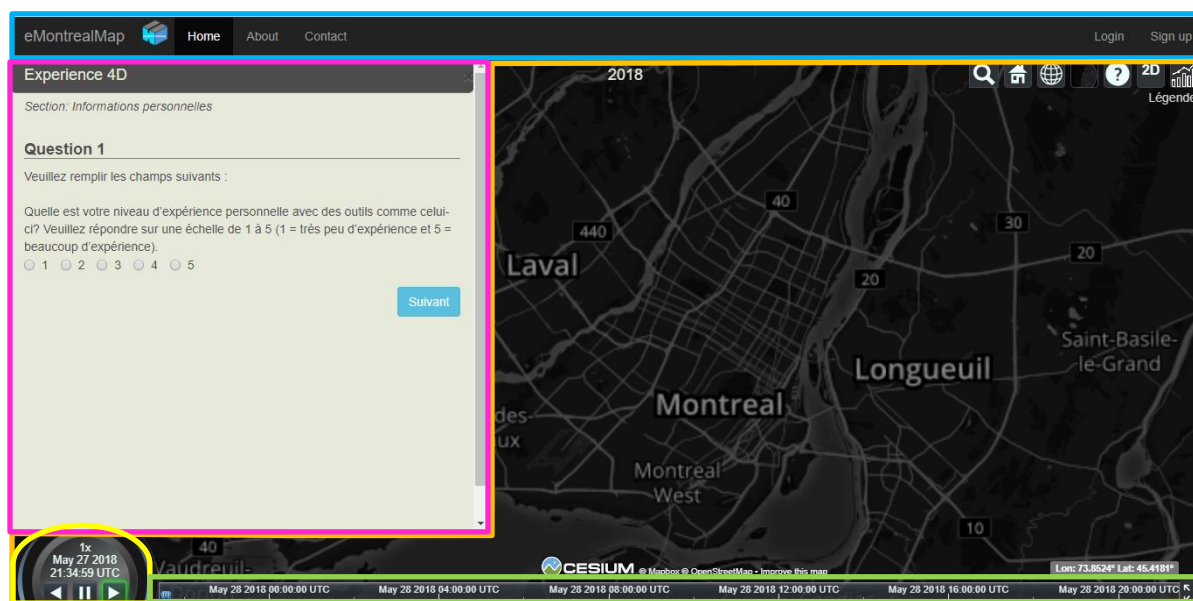


Figure 61 – Interface du prototype EMontrealMap. Le questionnaire avec les questions auxquelles les utilisateurs doivent répondre (ici question #1) se trouve à gauche (encadré rose); l'entête de l'interface se trouve en haut (encadré bleu), la scène 2D/3D au centre (encadré orange); l'horloge au bas à gauche (encadré jaune) et l'axe de temps (encadré en vert) au bas de l'écran.

La scène 2D/3D est l'élément contenant le plus de fonctionnalités. Premièrement, les fonctionnalités en haut à droite de la scène seront discutées (cf. Figure 62). En partant de

gauche à droite, nous avons (1) la recherche d'adresses (e.g. code postal, ville, rue, point d'intérêt, etc.); (2) le bouton « home » pour revenir à un niveau de zoom centré sur le globe terrestre; (3) le changement de projection, par exemple le passage d'un globe à une carte; (4) le changement de style de visualisation, e.g. passer d'un fond sombre plus abstrait à un fond plus réaliste (cf. Figure 63 et Figure 64); (5) les informations expliquant comment manipuler la scène; (6) le basculement de la visualisation 2D à 3D (désactive et active les bâtiments 3D); (7) l'affichage ou non du graphique. Cesium offre par défaut les fonctionnalités 1, 2, 3, et 5. Les autres fonctionnalités ont été développées dans le cadre de cette recherche.



Figure 62 – Fonctionnalités de la barre d'outils en haut à droite de la scène.



Figure 63 – Affichage du thème sombre. Cette figure montre le centre-ville de Montréal avec le fond de carte sombre de MapBox et les bâtiments sans texture. Plus de bâtiments sont affichés simultanément. Un bâtiment est représenté en bleu, car il a été sélectionné.

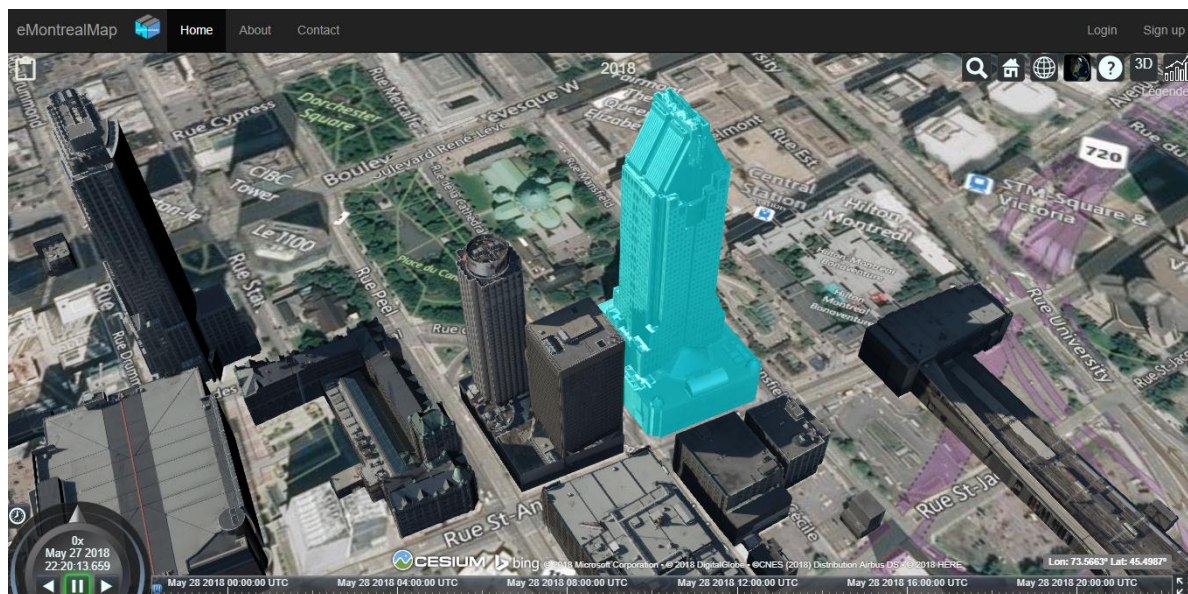


Figure 64 – Affichage du thème normal. Cette figure montre le centre-ville de Montréal avec le fond de carte Aerial Labels de Bing et les bâtiments avec texture. Moins de bâtiments peuvent être affichés simultanément. Un bâtiment est représenté en bleu, car il a été sélectionné.

Plusieurs fonctionnalités d'interaction et de requêtage ont été intégrées au prototype afin de permettre à l'utilisateur d'explorer les données visualisées et de mieux en comprendre leur nature. Si la vue est activée sur le globe, l'utilisateur peut se déplacer dans la scène avec les outils de navigation habituels soit *pan*, *zoom*, et *rotation*. Les fonctions *hover*, *click*, *multiclick* ont été programmés afin d'interagir avec les couches spatiales de la scène. La fonction *hover* illumine l'entité lorsque la souris est au-dessus. La fonction *click* illumine et affiche une fenêtre montrant les attributs de l'élément sélectionné. Enfin, la fonction *multiclick* (ctrl + clique) permet la sélection de plusieurs éléments à la fois (cf. Figure 65). Les fonctionnalités de clique sont utiles notamment pour effectuer des choix lors de la consultation.

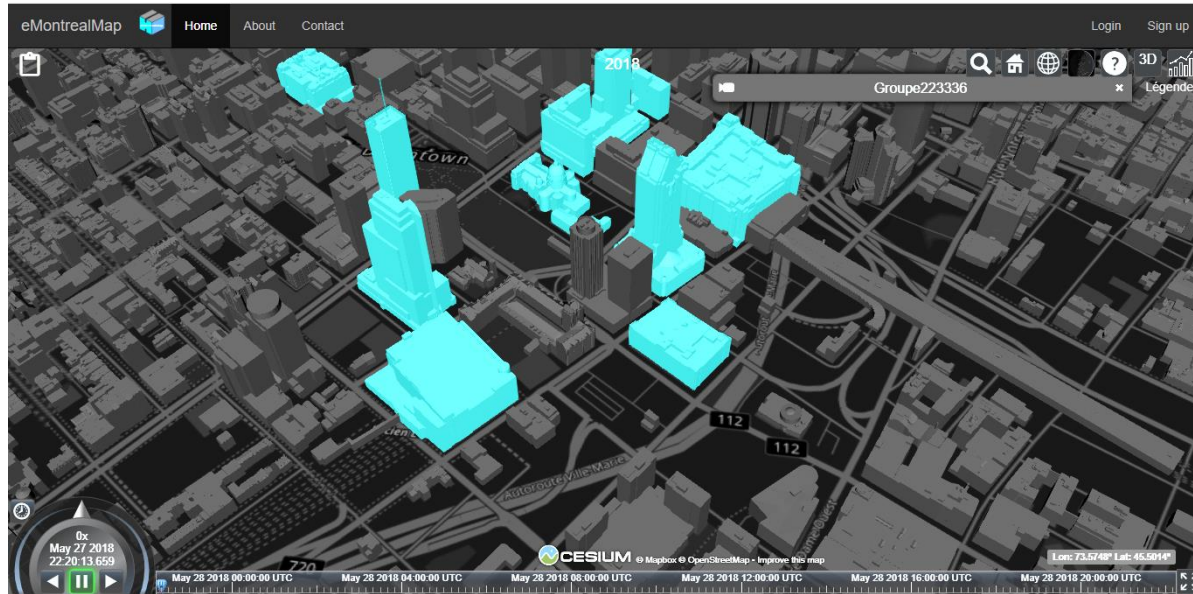


Figure 65 – Interaction avec la scène. La figure montre plusieurs bâtiments représentés en bleu et sélectionnés grâce à la fonctionnalité (CTRL + clique).

L'utilisateur peut aussi interagir avec le graphique pour explorer plus en profondeur les données illustrées. Il peut isoler la période temporelle à visualiser. Il peut aussi activer / désactiver des éléments du graphique pour isoler les informations à visualiser. Il peut diminuer la taille du graphique et afficher le graphique au besoin. Cette fonctionnalité permet plus de flexibilité et réduit le nombre d'informations affichées simultanément. La caméra de Cesium peut aussi être utilisée et déplacée pour offrir différentes perspectives sur les données visualisées. Par exemple, à chaque démarrage d'un scénario de consultation, la caméra est automatiquement ajustée pour configurer l'utilisateur dans le contexte de la situation géographique associée à la consultation et donc aux questions posées (cf. Figure 66).

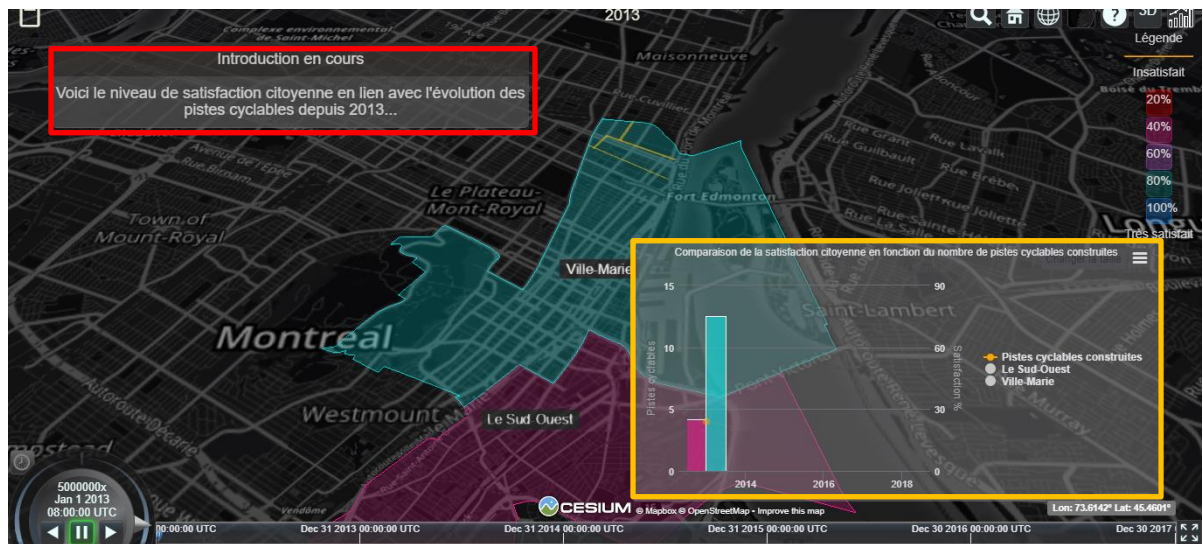


Figure 66 – La figure montre la fenêtre « introduction en cours » (encadré rouge) lorsque la caméra est contrôlée et déplacée automatiquement pour configurer la visualisation de manière cohérente avec la situation géographique de la consultation. Le graphique (encadré orange) est également affiché présentant de manière différente les informations associées aux couches spatiotemporelles.

La plateforme offre la possibilité de visualiser les informations en se déplaçant dans le temps. Avec l'utilisation de l'axe de temps et de l'horloge, l'utilisateur peut faire défiler les couches spatiales selon un pas de temps et celles-ci changent de contenu en conséquence. Il est nécessaire que les couches spatiotemporelles soient activées dans le questionnaire afin que leur état et contenu changent au fil du temps. En fait, chaque question du questionnaire contient des couches d'informations spatiales spécifiques. L'utilisateur peut découvrir la valeur des couches pour une année donnée en déplaçant simplement la souris sur le graphique.

### 3.4 Synopsis du chapitre

Le chapitre présent a porté sur la conception et le développement d'un prototype de cartographie web pour la participation citoyenne. Pour évaluer les choix conceptuels réalisés et expliqués aux chapitres 1 et 2, cinq scénarios de consultation citoyenne associés à la thématique d'aménagement urbain ont été conçus. Chacun de ces scénarios met à profit le

mécanisme de simulation spatiotemporelle ainsi que des représentations 2D / 3D basées sur les directives de représentation mises en place préalablement (cf. Chapitre 1). L'architecture élaborée pour l'implémentation du prototype s'inspire d'une architecture web classique divisée en deux sections : le côté serveur et le côté client. Le côté serveur se charge de faire le lien avec la base de données (où sont stockées les informations) et l'interface avec laquelle l'utilisateur va interagir. Les principales technologies côté serveur sont Node.js, MongoDB, et le module Express.js. Quant au côté client, les technologies utilisées sont Cesium, Highchart (pour les graphiques) et les technologies web classiques soit JavaScript, CSS et HTML. L'architecture est composée de deux composantes clés principales soit : la composante 3D qui fait référence aux bâtiments et la composante de simulation spatiotemporelle. La dernière partie du chapitre décrit et illustre le fonctionnement du prototype dans le contexte de chacun des scénarios de consultation citoyenne. Le prochain chapitre est consacré à la validation des résultats issus de tests de performance et des tests avec des groupes d'utilisateurs.



## Chapitre 4 - Résultats et discussion

*Ce chapitre présente et discute des résultats obtenus lors des tests de performance et des tests utilisateurs avec le prototype présenté au chapitre 3. Dans un premier temps, la finalité des tests sera présentée. Ensuite, les indicateurs utilisés pour les tests seront définis et justifiés. Enfin, les tests de performance et les tests effectués avec des utilisateurs seront présentés, analysés et discutés.*

### 4.1 Finalité et principaux éléments constitutifs des tests

Les tests visent à évaluer les éléments suivants : 1) l'adéquation des choix de représentation et de combinaison 2D/3D effectués selon les directives proposées au chapitre 1 et 2) l'efficacité du mécanisme de simulation spatiotemporelle proposé au chapitre 2. L'évaluation consiste à déterminer si ces éléments permettent aux participants de mieux comprendre les questions posées lors d'une consultation citoyenne, et plus spécifiquement le contexte inhérent à l'objet de la consultation ainsi que les impacts des choix que les participants envisagent de faire.

Les tests impliquent des évaluations tout au long de l'expérience et des évaluations à la fin de l'expérience. Les questions posées dans le cadre de ces évaluations portent aussi bien sur les sujets abordés dans les scénarios de consultation citoyenne que sur les représentations et simulations spatiotemporelles intégrées aux scénarios. Les réponses relatives à la consultation citoyenne ne sont pas analysées. Elles visent à mettre le participant dans un contexte participatif et à lui faire utiliser les fonctionnalités du prototype de plateforme. Les questions relatives aux représentations et simulations spatiotemporelles visent spécifiquement à vérifier l'adéquation des directives établies pour la sélection de ces éléments de représentation et simulation dans les scénarios. Rappelons que chaque scénario met en œuvre des directives de représentations et de simulation spatiotemporelle. Les questions peuvent être de nature quantitative et qualitative. Elles seront détaillées plus explicitement dans une prochaine

section. Le questionnaire d'évaluation remis à la fin de l'expérience contient une liste de sept affirmations pour lesquelles le participant doit signifier son degré d'accord ou de désaccord. Ces affirmations concernent l'appréciation générale qu'a le participant des représentations 2D/3D, des simulations spatiotemporelles et de l'expérience UI/UX au sein du prototype. Ce projet de recherche s'inscrit dans le domaine de la participation citoyenne. Les utilisateurs ciblés sont le grand public en général. L'évaluation de l'intuitivité du prototype ainsi que son accessibilité est donc requise afin de s'assurer qu'il rejoint le public cible.

## **4.2 Tests de performance du prototype**

Dans le contexte de cette recherche, les tests de performance servent à apporter les derniers correctifs à la plateforme pour s'assurer qu'elle est robuste, sans dysfonctionnement et que les visualisations s'affichent de manière fluide. Ainsi, on veut s'assurer que l'affichage des bâtiments 3D et les animations inhérentes à la simulation spatiotemporelle se déroulent de manière fluide, sans latence ni attente.

### **4.2.1 Test de performance de la composante 3D**

Les tests de performance ont concerné dans un premier temps le rendu des bâtiments 3D. Dans le prototype, il y a deux types de modèles de bâtiments 3D : des modèles texturés et des modèles non texturés. Les tests ont révélé que le modèle texturé est très exigeant en ressources machines (e.g. mémoire, GPU, CPU, stockage). Ce modèle a causé des problèmes de rendu dans Cesium. En effet, on a constaté que la plateforme cessait de fonctionner lorsque plus de 1000 bâtiments étaient affichés simultanément. Le problème est lié aux capacités graphiques de la machine utilisée et à WebGL. La machine utilisée pour ces tests présentait les caractéristiques suivantes : CPU Intel Core i5-5200U 2.20 Ghz Dual-Core, 8.00 GB RAM, GPU Intel HD Graphic 5500. Ainsi, les capacités graphiques du GPU se sont avérées limitées pour le rendu 3D visé. Pour pallier ce problème, la solution a été de contrôler le nombre de bâtiments affichés simultanément en modifiant le nombre de pixels visibles pour une tuile. Une tuile correspond à un ensemble de bâtiments d'une même région. Un nombre de pixels élevé limite le nombre de tuiles affichées simultanément. Pour le modèle texturé, le nombre

de pixels visibles a été fixé à une valeur de 250 pixels. Donc, les tuiles seront visibles à partir de 250 pixels. Cette valeur offre le meilleur compromis entre quantité de bâtiments affichés et performance obtenue. En ce qui concerne le modèle non texturé, cette visualisation est moins exigeante en ressources machines. Ainsi, le nombre de pixels visibles pour ce modèle a été fixé à 10 pixels. Cette valeur assure un affichage de plus de 5000 bâtiments simultanément.

#### **4.2.2 Test de performance du mécanisme de simulation spatiotemporelle**

Dans un deuxième temps, les tests de performance ont visé à améliorer les simulations spatiotemporelles à deux niveaux : la vitesse maximale de défilement du temps pour les animations et la fluidité des animations. La vitesse maximale de défilement du temps à laquelle la plateforme maintient sa fluidité et par conséquent, sa performance a été testée. Les tests ont démontré que la vitesse de défilement du temps ne doit pas dépasser 50 fois le nombre de secondes par année. Au-delà de cette limite, la plateforme a des problèmes de performance. En effet, le nombre d'images par seconde (aussi appelé « Frame Per Second » (FPS) en anglais) est beaucoup trop élevé, ce qui pose des problèmes de rendus graphiques. La fluidité des animations a également été testée. L'animation du scénario 4 portant sur l'évolution du NSC (Niveau de Satisfaction Citoyenne) dans le temps a présenté des problèmes de fluidité. En effet, il s'agit de l'animation la plus exigeante en matière de performance, car l'algorithme qui gère l'animation calcule pour chaque bâtiment visible, à quel quartier il appartenait, et ce à chaque seconde, puis colorie le bâtiment en fonction du NSC du quartier auquel il est associé. Deux améliorations ont été apportées à l'algorithme. Premièrement, les bâtiments ayant déjà été traités par l'algorithme ne sont pas traités une deuxième fois. Plutôt, une liste conserve les bâtiments déjà traités et c'est sur la base de cette liste que la couleur correspondant au NSC est appliquée. Deuxièmement, l'algorithme s'exécute maintenant de manière asynchrone, c'est-à-dire que l'algorithme s'exécute en arrière-plan tout en permettant au participant d'interagir avec l'application et ses fonctionnalités sans qu'il y ait des conflits avec l'animation.

## **4.3 Test d'évaluation du prototype par des utilisateurs**

### **4.3.1 Contexte de mise en œuvre du test**

Tout d'abord, mentionnons que les tests utilisateurs ont été réalisés dans le respect des règles relatives à l'éthique de l'Université Laval. L'échantillon choisi pour réaliser les tests utilisateurs n'était pas représentatif de la population. Par conséquent il ne permet pas la validation du prototype développé dans un contexte de participation citoyenne. Ceci constitue donc une limite importante de notre recherche. Néanmoins, l'échantillon permet de valider les concepts inhérents à cette recherche. En effet, nous souhaitons en premier lieu valider l'adéquation des représentations 2D/3D proposées et du mécanisme spatiotemporel. Une autre phase de tests avec un échantillon représentatif de la population sera réalisée postérieurement à cette recherche afin de valider le prototype dans un contexte participatif. L'échantillon était composé de 21 personnes et la majorité des participants (86%) possédait un niveau d'expérience entre « plutôt expérimenté » et « très expérimenté » (cf. Figure 68). Ceci n'est pas surprenant considérant que la majorité des participants avait un profil en sciences géomatiques. Seulement trois des participants possédaient un profil différent, soit respectivement en systèmes d'informations, en psychologie et en communication. De ces 21 participants, 15 appartenaient au Département des sciences géomatiques de l'Université Laval (UL) et 6 étaient membres de l'Unité Mixte de Recherche en sciences urbaines (UMRsu). Parmi les 21 participants au test, 8 suivaient le même cours en classe au Département des sciences géomatiques et ont réalisé le test dans le cadre de ce cours (cf. Figure 67), 5 autres ont fait l'expérience en personne dans un cadre non formel à l'UL, 5 ont fait l'expérience en ligne depuis leur domicile, et 3 ont réalisé l'expérience à l'UMRsu. Les tests se sont déroulés sur une période de deux semaines, soit du 21 au 30 mars 2018. Les tests au Département des sciences géomatiques se sont déroulés du 21 au 24 mars, alors que les tests à l'UMRsu ont eu lieu du 25 au 30 mars 2018.



Figure 67 – Tests utilisateurs dans un cours du Département des sciences géomatiques à l'Université Laval.

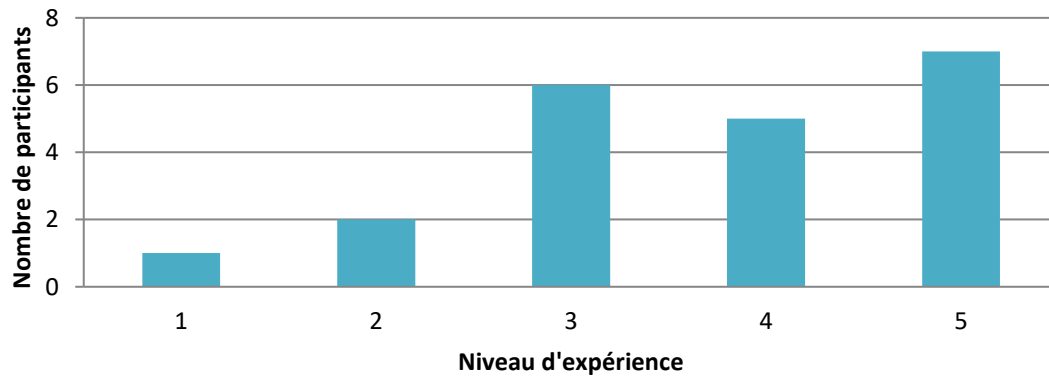


Figure 68 – Le niveau d'expérience des 21 utilisateurs avec l'utilisation de plateformes similaires de cartographie web. Sur l'axe des « x », un niveau d'expérience de 1 signifie « Aucunement expérimenté » ; 2 pour « Peu expérimenté » ; 3 pour « plutôt expérimenté » ; 4 pour « expérimenté » ; 5 pour « très expérimenté ». Sur l'axe des « y » figure le nombre de participants pour chaque catégorie.

Juste avant le début des tests, une vidéo d'une durée de cinq minutes expliquant le fonctionnement du prototype a été mise à disposition des participants. La durée totale estimée pour réaliser l'expérience du prototype était de 25 minutes. Cette durée a été estimée à partir des tests préliminaires réalisés avec deux participants. Néanmoins, l'expérience s'est avérée trop longue pour les quatre premiers participants qui ont pris part aux tests. La durée moyenne était de 1 heure et 10 minutes. Afin de réduire la durée de l'expérience, nous avons décidé de retirer les scénarios 2 et 3 du formulaire pour le reste des participants. Celles-ci étant plutôt introductives et répétitives avec la question 4, elles pouvaient être retirées du test sans altérer les évaluations qui étaient ciblées. De plus, seules les représentations liées aux animations ont été évaluées pour simplifier les tests d'évaluation pour les participants. Ces représentations sont suffisantes pour valider les concepts reliés à cette recherche.

En termes d'évaluation, l'expérience est constituée de deux parties distinctes. La première partie concerne les questions qui sont posées tout au long de l'expérience. La deuxième concerne un questionnaire remis à la fin de l'expérience. Ce questionnaire contient une série d'affirmations pour lesquelles le participant doit mentionner son accord ou son désaccord. La section suivante vise à expliquer plus en détail ces deux parties de l'expérience.

### **4.3.2 Indicateurs et métriques d'évaluation**

Le Tableau 5 présente la liste de questions intégrées dans le prototype et qui sont posées tout au long de l'expérience. Ces questions proposent des choix de réponses. Le nombre de votes pour chaque choix a été comptabilisé et des statistiques (i.e. moyenne, écart-type) ont été tirées de cette comptabilité

*Tableau 5 – Questions posées tout au long de l'expérience. Les questions sont regroupées selon leur scénario respectif (l'Annexe A propose les questions relatives à la consultation citoyenne posées dans le cadre de chaque scénario).*

<b>Scénario #</b>	<b>Question</b>
-------------------	-----------------

---

1. Qu'est-ce que vous a aidé à répondre aux questions ci-dessus (voir Annexe A question #4)? Veuillez choisir au moins une réponse parmi : bâtiments 3D, le graphique, l'animation, toutes ces réponses, autres (veuillez préciser).

**3**

2. Comment évaluez-vous la représentation de l'évolution du niveau de satisfaction citoyenne en 3D? (I.e. Confuse, claire, stimule la curiosité, augmente la compréhension du processus, autre (veuillez préciser)).

---

**4**

1. Est-ce que visualiser l'impact de vos choix vous a permis de prendre une meilleure décision? (i.e. Oui, non, peut-être, ou autres (veuillez préciser)).

---

1. Comment évaluez-vous la représentation de l'évolution de nouveaux bâtiments en 3D? (I.e. Confuse, claire, stimule la curiosité, augmente la compréhension du processus, autre (veuillez préciser)).

**5**

2. Comment évaluez-vous la représentation de l'évolution de la densité de population en 3D? (I.e. Confuse, claire, stimule la curiosité, augmente la compréhension du processus, autre (veuillez préciser)).

---

Le questionnaire remis à la fin de l'expérience contient des affirmations pour lesquelles le participant doit spécifier son degré d'accord ou de désaccord (cf. Tableau 6). À cet effet, le participant dispose d'une échelle de valeurs variant de 0 à 10, 0 signifiant « Pas du tout d'accord » et 10 signifiant « Tout à fait d'accord ». Cette échelle de valeurs est utilisée au cours de l'analyse des résultats, seulement à titre de référence pour les statistiques qui ont été comptabilisées (i.e. moyenne et écart-type). L'équivalent nominal pour cette échelle numérique est le suivant :

- 0, 1 et 2 : Pas du tout d'accord
- 3 et 4 : Pas d'accord

- 5 et 6 : Ni en désaccord, ni d'accord
- 7 et 8 : D'accord
- 9 et 10 : Tout à fait d'accord

*Tableau 6 – Ce tableau montre les affirmations posées à la fin de l'expérience regroupées par concept de validation.*

#	Affirmation
<b>Combinaison des représentations 2D et 3D</b>	
1	En comparaison avec la dimension 2D, la dimension 3D m'a permis de mieux comprendre le contexte géographique de la question m'aidant ainsi à donner une réponse plus informée.
2	L'option du changement de la vue entre 'normal' et 'dark' était intéressante et cela m'a permis de mieux mettre en évidence ce qui était montré. Par exemple, la vue 'normal' était intéressante pour obtenir plus de détails réalistes, tandis que la vue 'dark' permettait de mettre l'emphase sur ce qui était montré.
<b>Le mécanisme de simulation spatiotemporelle</b>	
3	Les simulations dans l'espace et le temps m'ont permis de mieux comprendre l'évolution des informations concernées par les questions (ex. satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables construites, pistes cyclables proposées).
4	Les visualisations 3D + temps (ex. Satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables) étaient claires et intuitives.
5	Les simulations dans l'espace et le temps sont pertinentes pour montrer des propositions futures et l'impact des choix réalisés.
6	En général, le graphique m'a aidé à mieux comprendre la simulation espace-temps des éléments géographiques (ex. satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables).
<b>Le UI et UX</b>	
7	Les introductions à chaque début de question sont utiles, voire essentielles pour bien mettre en contexte.



En plus des questionnaires, les évaluations reposent sur un ensemble d'observations faites lors de la réalisation du test par les participants. Ainsi, nous avons recensé : 1) le nombre de fois où un participant a sollicité notre aide ainsi que la cause de cette sollicitation (e.g. dysfonctionnements, question insuffisamment claire, difficulté à interagir avec la plateforme) ; 2) le temps requis par chaque participant pour compléter l'expérience. Nous avons utilisé ces mesures en tant qu'indicateur de l'intuitivité de la plateforme.

## **4.4 Résultats et analyse des tests utilisateurs**

La présente section présente les résultats obtenus et leurs analyses pour chacun des concepts à valider, soit : 1) l'adéquation des choix de représentation et de combinaison 2D/3D ; 2) le mécanisme de simulation spatiotemporelle et 3) l'UI et l'UX. Ensuite, pour chaque concept, les questions/affirmations relatives seront présentées et analysées. Les questions posées au long de l'expérience seront abordées en premier suivies des affirmations posées à la fin de l'expérience. Les résultats de nature quantitative (i.e. moyenne, écart-type) seront abordés en premiers suivis des résultats qualitatifs (e.g. commentaires des participants).

### **4.4.1 Les représentations 2D et 3D**

Nous allons aborder en premier lieu les réponses aux questions qui ont été posées tout au long de l'expérience. Dans le cadre du scénario #3, on a demandé aux participants d'évaluer la représentation du niveau de satisfaction citoyenne (NSC) à l'aide d'un modèle urbain 3D (i.e. via les bâtiments). La Figure 69 présente les résultats obtenus pour la question n°2 posée dans ce scénario (cf. Tableau 5). On constate que : 29% des participants ont jugé que la représentation a stimulé la curiosité; 28% ont trouvé qu'elle était confuse ; 24% ont trouvé la représentation claire ; 14% ont trouvé qu'elle apportait autre chose et 5% ont trouvé que la représentation a augmenté la compréhension du NSC dans le temps. Les opinions en matière de perception sont donc assez partagées. Bien que la représentation n'ait pas été totalement comprise, il y a néanmoins 29% des participants qui ont été stimulés par cette représentation.

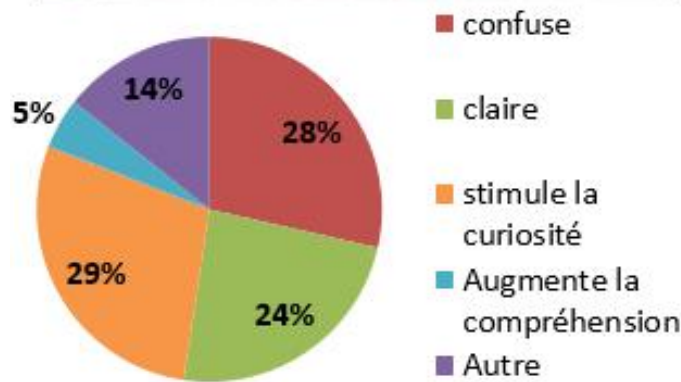
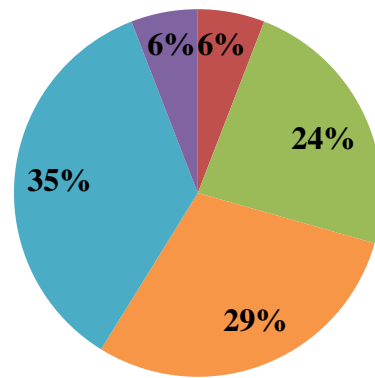
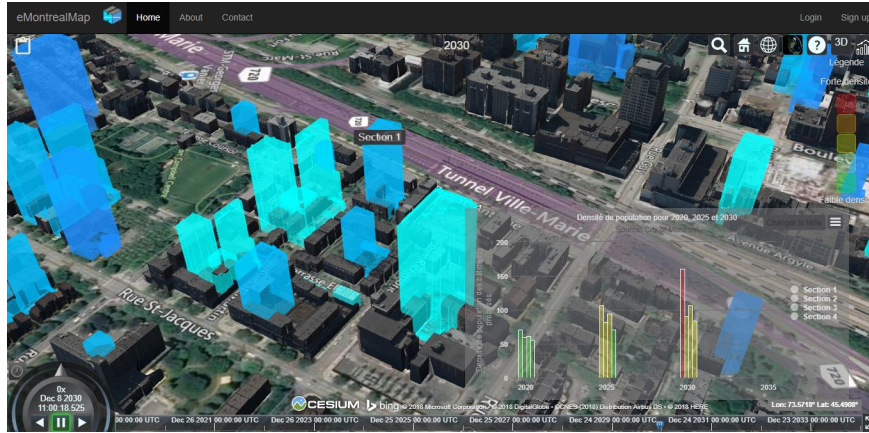


Figure 69 - L'image du haut montre un aperçu de la scène dans le cadre du scénario #3. Le graphique au bas de l'image montre la perception des participants à l'égard de la représentation du NSC à l'aide des modèles urbains.

Pour mieux comprendre la nature de ces résultats, l'analyse des commentaires a été réalisée. La surcharge d'information a été mentionnée par un participant au sujet de la représentation : « La représentation du NSC stimule la curiosité, mais elle contient beaucoup d'information simultanément, ce qui augmente la complexité visuelle (i.e. plus de temps pour traiter l'information). » D'autres participants ont mentionné que la 3D n'était pas nécessaire pour représenter le NSC dans le temps, car elle complexifiait les choses. À cet effet, un participant dit « J'ai effectué mon analyse uniquement à partir du graphique et de la carte en 2D. Je n'ai pas vu l'utilité de la 3D ». Un participant mentionne même que la représentation du NSC n'est pas adaptée au contexte de la question : « Inadaptée à la question. Il ne faudrait pas avoir une représentation de chaque bâtiment 3D, mais plus les quartiers soient sous forme de volumes ou de limites en 3D avec les couleurs associées aux satisfactions. ».

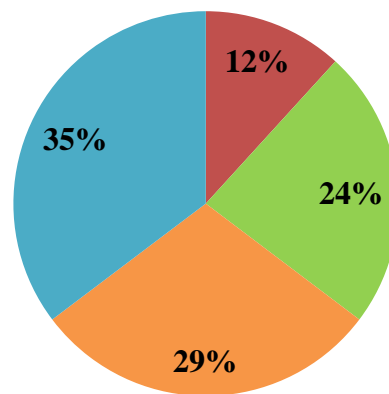
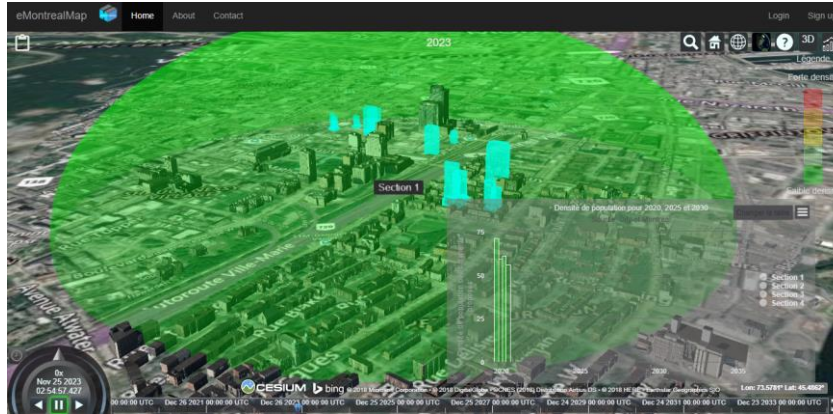
L'analyse des données révèle donc que la représentation du NSC par des modèles urbains n'est pas applicable dans son état actuel. Toutefois, le fait que respectivement 24% et 29% des participants ont trouvé la représentation claire et stimulante nous laisse croire qu'elle doit être réévaluée à nouveau dans un autre contexte ou en apportant des améliorations.

En deuxième lieu, dans le cadre du scénario #5, on a demandé aux participants d'évaluer la représentation de la construction de nouveaux bâtiments (CNB) par un modèle naturel des bâtiments ainsi que la représentation de la densité de population (DP) par une demi-sphère. D'une part, la Figure 70 présente les résultats obtenus pour la question n°1 posée dans ce scénario (cf. Tableau 5). On constate que : 35% ont trouvé que la représentation a augmenté la compréhension du CNB dans le temps ; 29% des participants ont trouvé la représentation claire ; 24% ont trouvé que la représentation augmentait la curiosité ; seulement 6% ont trouvé qu'elle était confuse. À première vue, les opinions en matière de perception semblent positives et convergées vers une acceptation de la méthode de représentation choisie. Bien que la représentation n'ait pas été totalement comprise, il y a néanmoins 29% des participants qui ont été stimulés par cette représentation. D'autre part, la Figure 71 présente les résultats obtenus pour la question n°2 posée dans ce scénario (cf. Tableau 5). On constate que : 35% ont trouvé que la représentation a augmenté la compréhension de la DP dans le temps ; 29% des participants ont trouvé que la représentation augmentait la curiosité ; 24% ont trouvé la représentation claire ; 12% ont trouvé qu'elle était confuse. Les opinions en matière de perception sont assez semblables à la CNB, néanmoins il y a eu plus de confusion.



■ confuse ■ claire ■ stimule la curiosité ■ augmente la compréhension ■ Autre

Figure 70 - L'image du haut montre un aperçu de la CNB (construction de nouveaux bâtiments) dans le cadre du scénario #5. Au bas, le graphique à pointe de tartes montre la répartition des avis pour la représentation de la CNB à l'aide de modèle naturel et urbain.



■ confuse ■ claire ■ stimule la curiosité ■ augmente la compréhension

Figure 71 - L'image du haut montre un aperçu de la DP dans le cadre du scénario #5. Au bas, le graphique à pointe de tartes montre la répartition des avis pour la représentation de la DP (densité de population) à l'aide d'une demi-sphère.

Pour mieux comprendre la nature de ces résultats, l'analyse des commentaires a été réalisée. Concernant la CNB, l'augmentation de la compréhension de l'évolution du développement immobilier a été mentionnée par un participant : « la représentation par CNB est claire et augmente la compréhension vis-à-vis de l'évolution du développement immobilier. » Concernant la DP, le fait que le changement dans le temps pour la DP était à la fois spatial et sémantique a semé de la confusion chez trois participants. Deux commentaires vont en ce sens : « La représentation par DP stimule la curiosité, mais le périmètre qui augmente avec le temps,

laisse relativement confuse. » ; « La représentation DP est claire, mais je n'augmenterais pas la taille des demi-sphères, seulement la couleur, car cela donne l'impression que la superficie des secteurs augmente. Je proposerais alors des rectangles qui augmentent en hauteur en fonction de la densité, mais sans changer de surface au sol, par exemple ? » Ce qui est intéressant ici, c'est que les deux participants n'ont pas compris qu'effectivement, le secteur délimitant les nouvelles constructions prend de l'expansion avec le temps, par conséquent la DP aussi. Néanmoins, quelques participants, neuf au total, ont aimé la représentation de la DP par une demi-sphère. À cet effet, ils ont clairement explicité leur enthousiasme mentionnant à deux reprises qu'elle était « cool » et « intéressante ». Un autre participant cite même que la DP a permis de mieux guider ses choix concernant l'approbation de certains bâtiments: « [...] l'information sur la densité de la population me guide un peu plus dans la réalisation de mes choix. »

L'analyse des données révèle donc que la représentation de la CNB et de la DP sont applicables. Toutefois, le fait qu'il y ait eu de la confusion dans la compréhension de la DP nous laisse croire qu'elle doit être réévaluée à nouveau dans un autre contexte ou en apportant des améliorations.

Abordons maintenant les résultats relatifs aux affirmations posées à la fin de l'expérience. Le tableau ci-dessous synthétise les valeurs moyennes et l'écart-type des degrés d'accord indiqués pour chaque affirmation en lien avec le choix de représentation et de combinaison 2D / 3D. L'affirmation #1 évalue si la 3D spatiale est toujours meilleure que la 2D spatiale lorsqu'il s'agit de communiquer des informations. L'affirmation #2 évalue si les deux niveaux de réalisme des bâtiments 3D (i.e. sombre plus abstrait et normal plus réaliste) étaient pertinents et utiles pour mieux comprendre le contenu de la scène visualisée.

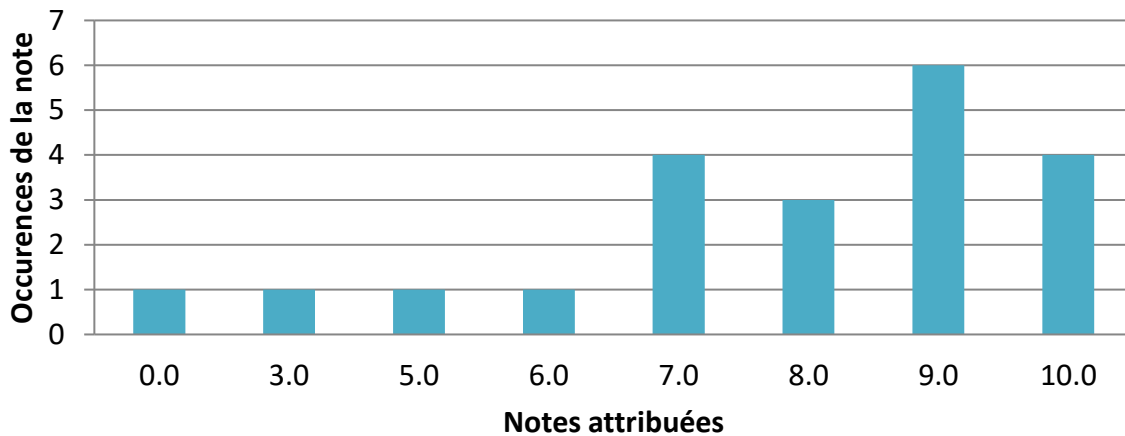
Tableau 7 – Valeurs moyennes et écarts-types calculés sur la base du degré d'accord avec les affirmations relatives au choix de représentation et de combinaison 2D / 3D.

#	Question	Moyenne Sur 10	Écart-Type
<b>La combinaison de représentation 2D et 3D</b>			
1	En comparaison avec la dimension 2D, la dimension 3D m'a permis de mieux comprendre le contexte géographique de la question m'aidant ainsi à donner une réponse plus informée.	8.1	1.6
2	L'option du changement de la vue entre 'normal' et 'dark' était intéressante et cela m'a permis de mieux mettre en évidence ce qui était montré. Par exemple, la vue 'normal' était intéressante pour obtenir plus de détails réalistes, tandis que la vue 'dark' permettait de mettre l'emphase sur ce qui était montré.	7.6	2.5

Pour ce qui est de l'affirmation #1, les participants ont donné une note moyenne de 8.1/10 avec un écart-type de 1.6. Cela met en évidence que pour la plupart des participants, la 3D a été plus efficace que la 2D pour communiquer l'information spatiale. L'écart-type de 1.6 montre que l'opinion des participants est plutôt homogène et donc en accord avec l'affirmation. Néanmoins, l'analyse des commentaires révèle une divergence des opinions, car 13 participants sur 21 ont mentionné que la 3D n'a pas été utile pour visualiser des pistes cyclables en 2D, alors que la 3D s'est révélée pertinente, voire essentielle pour visualiser la construction de nouveaux bâtiments. Un commentaire d'un participant va en ce sens : « la 3D a été utile pour les bâtiments, mais pour les pistes cyclables non ».

Dans le cas de l'affirmation #2, les résultats obtenus montrent que les participants ont donné une note moyenne de 7.6/10 avec un écart-type de 2.5 (cf. Figure 72). Donc, les participants sont généralement en accord avec l'affirmation, mais il y a une certaine divergence d'opinion puisque l'écart-type est de 2.5. L'analyse des commentaires a également permis d'en savoir plus. Ceux-ci soulignent que le style abstrait n'était pas nécessairement plus utile pour apporter

du contraste avec d'autres informations spatiales, mais son utilité venait de sa capacité à être moins exigeant en termes de capacité machine. En ce sens, deux participants ont mentionné l'utilité du style plus abstrait pour réduire les demandes en capacité machine (e.g. CPU, GPUs) : « En vertu des demandes au système, la vision sombre est apparue plus utile que la vision normale. » ; « L'usage du style sombre abstrait a surtout été pour alléger la visualisation des données. » Bien que le style abstrait offre de meilleures performances dans l'ensemble, cela peut aussi induire des nuisances puisque plus de bâtiments peuvent être affichés simultanément. Ce fait a été mentionné par un participant : « il y a trop de bâtiments et cela alourdit considérablement l'affichage (et cela consomme beaucoup d'énergie machine) ».



*Figure 72 – Histogramme montrant la distribution des avis relatifs à l'affirmation #2 portant sur deux niveaux de réalisme pour les bâtiments et le fond de carte : sombre-abstrait et réaliste.*

L'analyse des résultats relatifs aux représentations 2D et 3D révèle que certaines informations sont représentées plus intuitivement en 3D (e.g. bâtiments) et d'autres en 2D (e.g. pistes cyclables).



#### 4.4.2 Le mécanisme de simulation spatiotemporelle

Tout d'abord, abordons les questions qui ont été posées tout au long de l'expérience, en débutant avec le scénario #3. Dans le cadre du scénario #3, on a demandé aux participants d'évaluer quels éléments (i.e. bâtiments 3D, le graphique, l'animation, toutes ces réponses, autres) leur a permis de vérifier s'il existait une corrélation entre les PCP et le NSC. La Figure 73 présente les résultats obtenus pour la question n°1 posée dans ce scénario (cf. Tableau 5). On constate que : 3 participants sur 21 ont mentionné que les bâtiments ont aidé à corréler les PCP et le NSC ; 16 participants sur 21 ont mentionné le graphique ; 15 participants sur 21 ont mentionné l'animation des PCP ; 14 participants sur 21 ont mentionné l'animation du NSC ; 1 participant sur 21 a mentionné que tous les éléments ont été utiles ; et 1 participant sur 21 a mentionné qu'un autre élément non mentionné a été utile. Les opinions semblent donc converger vers le graphique et les animations. On remarque que les bâtiments n'ont pas été utiles pour vérifier une corrélation entre les PCP et le NSC.

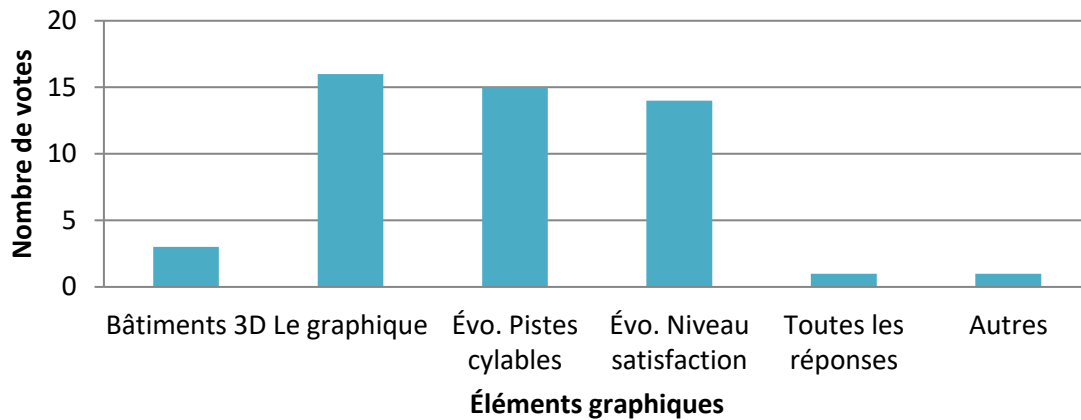


Figure 73 – Histogramme montrant le nombre de votes attribué à chaque élément graphique du scénario #3.

Pour ce résultat, il n’y a pas de commentaires qui ont été émis. Ainsi, le graphique et les animations sont les éléments ayant permis de corrélérer les PCP et le NSC. La 3D n’a pas été jugée comme importante dans ce contexte.

Abordons maintenant les affirmations relatives au questionnaire remis à la fin de l’expérience. Le Tableau 8 ci-dessous synthétise les valeurs moyennes et l’écart-type des degrés d’accord indiqués pour chaque affirmation reliée au mécanisme de simulation spatiotemporelle. Les affirmations #3 à #6 visent à valider les concepts liés au mécanisme de simulation spatiotemporelle. L’affirmation #3 évalue si les visualisations spatiotemporelles en 3D sont assez intuitives et claires pour bien communiquer l’information évoluant dans le temps. Cette question touche à la fois les méthodes de représentation et le mécanisme de simulation spatiotemporelle. L’affirmation #4 évalue si les simulations spatiotemporelles permettent d’apporter une meilleure compréhension du contexte spatial et temporel à travers les cartographies en général. L’affirmation #5 évalue la pertinence du mécanisme de simulation spatiotemporelle pour visualiser l’état de la ville dans le temps, plus spécifiquement les propositions d’aménagements futurs et l’impact des choix réalisés. L’affirmation #6 évalue la pertinence du graphique lors des simulations spatiotemporelles.

*Tableau 8 – Valeurs moyennes et écarts-types calculés sur la base du degré d’accord avec les affirmations concernant le mécanisme de simulation spatiotemporelle.*

#	Question	Note moyenne Sur 10	Écart-Type
<b>Le mécanisme de simulation spatiotemporelle</b>			
3	Les simulations dans l’espace et le temps m’ont permis de mieux comprendre l’évolution des informations concernées par les questions (ex. satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables construites, pistes cyclables proposées).	8.4	1.6

	Les simulations dans l'espace et le temps sont pertinentes		
<b>4</b>	pour montrer des propositions futures et l'impact des choix réalisés.	9.1	1.3
	En général, le graphique m'a aidé à mieux comprendre la		
<b>5</b>	simulation espace-temps des éléments géographiques (ex. satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables).	7.9	1.4
	Les visualisations 3D + temps (ex. Satisfaction citoyenne,		
<b>6</b>	bâtiments, pistes cyclables) étaient claires et intuitives.	7.0	1.9

---

La première affirmation évaluée est l'affirmation #3. L'analyse des résultats montre que les participants ont attribué une note moyenne de 8.4 sur 10 avec 1.6 d'écart-type. La note signifie que les participants ont généralement reconnu l'importance des simulations spatiotemporelles dans un contexte où les informations spatiales concernées par la consultation possèdent une composante temporelle. À cet effet, un participant mentionne que le temps est une fonctionnalité importante et pertinente pour mieux comprendre les phénomènes concernés « Oui, la composante temporelle associée à l'espace permet de mieux appréhender et comprendre le phénomène questionné. C'était pertinent de l'avoir. » Un autre participant mentionne que le temps doit être ajouté aux cartographies actuelles : « Oui le temps est probablement un point majeur à conserver et même à ajouter à la carte. »

Pour ce qui est de l'affirmation #4, les résultats montrent que les participants ont donné une note moyenne de 9.1/10 avec 1.3 d'écart-type. Cela montre que les simulations spatiotemporelles offrent la capacité de visualiser les impacts des choix réalisés lors de la consultation. L'analyse des commentaires permet de mieux comprendre la nature de cette note. Un participant mentionne que les simulations spatiotemporelles permettent aux citoyens de mieux comprendre la planification offerte par la ville et ses impacts, et que cela peut aller en faveur de la ville, car un citoyen bien informé de la situation accepte plus facilement les décisions prises par la ville : « Permet de se projeter dans le futur pour mieux comprendre la planification et les impacts. Le message passe mieux. » À cet effet, un autre participant mentionne : « Le citoyen moins impliqué voudra voir, comprendre et surtout donner

son opinion sur les constructions dans son secteur. Ce n'est pas tout le monde qui comprend l'impact des décisions simplement sur des rapports papier, plusieurs sont visuels et l'application leur permet de satisfaire leurs besoins. »

Dans le cas de l'affirmation #5, l'analyse des résultats montre que les participants ont donné une note moyenne de 7.9/10 avec un écart-type de 1.4. Cela montre que généralement les participants sont d'accord avec la pertinence du graphique pour appuyer la simulation spatiotemporelle. L'analyse des commentaires a permis de connaître plus en détail la nature de cette note. Un participant mentionne que le graphique établit des liens rapides entre les données, et ce d'une manière simple : « le graphique permettait de faire des liens rapides entre les différents éléments qui étaient montrés. » Selon un autre participant, le graphique était un autre élément visuel offrant une perspective différente aux animations et augmentant la compréhension : « Le graphique permet un autre aspect visuel augmentant la compréhension! » « Le graphique est un bon complément à la carte, mais il doit rester le plus simple possible. » Toutefois, certains participants soulignent qu'il n'était pas toujours utilisé de manière adéquate au sein de la plateforme. À cet effet, un participant mentionne : « Le graphique a été utile surtout pour les questions sur les pistes de cyclables. Pour les nouveaux bâtiments, le graphique n'a pas été nécessairement utile. » « Le graphique est très utile dans les premiers scénarios, mais pas dans le dernier (scénario #5) [...] » Au scénario #5, le graphique montrait l'évolution de la densité de population. Aucune question n'a été posée sur ce sujet ou n'a nécessité d'avoir recours à cette information. Dans ce contexte, le graphique proposé était effectivement inutile pour répondre aux questions. De plus, le graphique prenait beaucoup de place dans l'écran selon un participant : « Le graphique prenait souvent beaucoup de place dans l'écran, surtout avec le formulaire ouvert. » Néanmoins, l'option de réduire sa taille ou de l'enlever a été appréciée par trois participants : « [...] J'ai apprécié qu'on puisse en réduire la dimension du graphique [...]. » « [...] il est intéressant d'avoir la possibilité d'afficher le graphique ou pas ». D'autres ont proposé de rendre sa taille ajustable afin de limiter l'occultation de la scène « [...] Suggestion: Le graphique pourrait être minimisable ».

La dernière affirmation traitant du mécanisme de simulation spatiotemporelle est l'affirmation #6. Elle a obtenu une note moyenne de 7.0/10 avec un écart-type de 1.9. Cela montre que généralement les participants sont d'accord avec l'affirmation, un commentaire d'un participant va en ce sens : « Oui, la majorité des animations 3D étaient claires et intuitives. ». Mais la distribution des opinions est hétérogène avec un écart-type de 2 (cf. Figure 74).

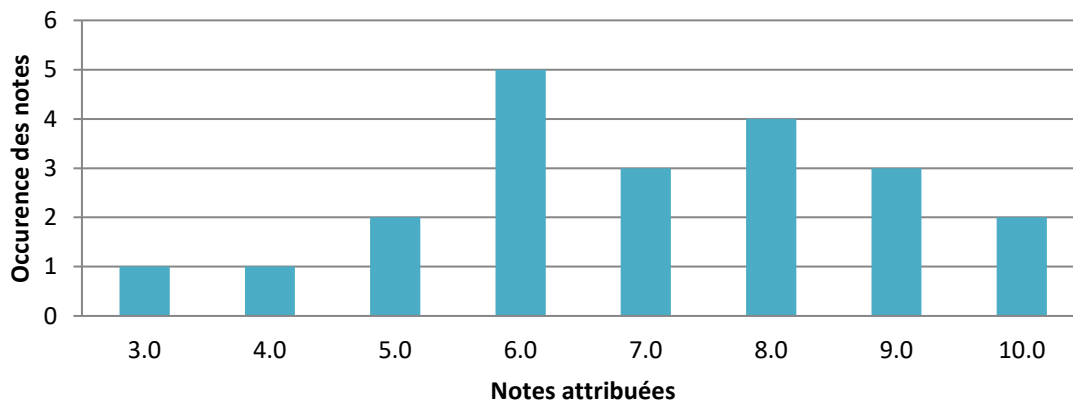


Figure 74 – Distribution des avis pour l'affirmation #6.

Pour mieux comprendre le fort écart-type, l'analyse des commentaires a été réalisée. En général, l'animation 3D intervenant dans le cadre du scénario #5 sur la CNB a été bien comprise et appréciée des participants. La couleur associée aux différents pas de temps du CNB a aussi été appréciée d'un participant « C'est bien de voir les couches proposées en couleur pour y voir un meilleur focus ». Toujours au scénario #5, un autre participant n'a pas trouvé l'animation 3D de la densité de population intuitive : « Les animations 3D ne sont pas toujours intuitives notamment pour le scénario #5 avec l'augmentation de la taille des secteurs en fonction de temps. » Au sujet du scénario #4, un participant mentionne que la 3D rend la visualisation moins claire lorsqu'on visualise des informations spatiales en 2D : « C'est la partie moins claire selon moi. Le fait de visualiser des lignes de pistes cyclables 2D à travers un environnement bâti 3D n'est pas toujours clair. » Un autre participant mentionne d'utiliser des couleurs bien discernables pour représenter les différents pas de temps. Selon lui, les couleurs n'étaient pas toujours choisies pour bien montrer l'évolution, particulièrement les

teintes de bleu utilisé pour l'animation des pistes cyclables futures au scénario #4 : « Il faudrait utiliser des couleurs différentes pour bien comprendre la différence de temps. » « Attention à la palette de couleur utilisée, les pas de temps sont difficilement discernables. » En ce qui concerne le scénario #3, l'animation 3D relative au NSC et aux pistes cyclables a été moins bien comprise. En ce sens, beaucoup de participants (15 au total) ont perçu l'animation 3D du NSC au scénario #4 comme étant surchargée en information : « L'animation 3D du NSC peut prêter à confusion. Il semble y avoir un peu trop d'information, ou il faut un peu plus de temps pour comprendre. » « [...] l'exercice avec le NSC m'est apparu complexe. Il pourrait causer une surcharge d'information chez l'utilisateur de l'outil. » Il est vrai que beaucoup d'événements intervenaient simultanément pour le scénario #4 avec le NSC : le curseur temporel évoluait dynamiquement; différentes couches d'informations (ex. bâtiments 3D passant de rouge à bleu, pistes cyclables apparaissant et disparaissant, graphiques se mettant à jour, etc.) changeaient leur état à chaque pas de temps : l'apparition et la disparition des bâtiments contribuaient au lot de changement survenu dans la scène. Il importe de mentionner la citation d'un participant au sujet du temps d'adaptation pour les animations sur le NSC :

C'est clair, mais je peux dire que la représentation du NSC a stimulé ma curiosité, car j'ai fait plusieurs simulations pour mieux comprendre le lien spatial avec la variation temporelle de la satisfaction des citoyens par rapport aux pistes cyclables. D'une première vue, je n'étais pas capable de voir l'évolution sur le plan spatial vu que l'information sémantique et spatiale évolue en même temps. Mais ensuite, j'ai pu différencier l'évolution de la satisfaction en tant que telle de l'évolution spatiale en fonction de la représentation 3D des bâtiments.

En lien avec l'UI et le côté 3D des animations, certains participants (12 au total) ont eu de la difficulté à naviguer dans la scène : « Je ne sais pas si le grand public saurait naviguer dans l'espace aussi bien que quelqu'un qui s'y connaît » ; « J'avais parfois de la difficulté à naviguer efficacement dans l'environnement. Un outil PAN facilement accessible serait très utile pour aider dans la navigation. »

Les résultats révèlent donc que le mécanisme de simulation spatiotemporelle conçu dans cette recherche ainsi que ses composantes (i.e. animations, graphiques et axe de temps) sont

pertinents pour visualiser et analyser les impacts des choix réalisés lors d'une consultation. Néanmoins, les résultats montrent également que la 3D plus temps (4D) n'est pas toujours meilleure pour visualiser des informations spatiotemporelles. Donc, selon nos observations, si l'information spatiale est a priori représentée en 2D, elle sera plus intuitivement visualisée dans un contexte de 2D + temps et vice-versa.

#### **4.4.3 L'interface utilisateur et l'expérience utilisateur**

L'indicateur utilisé dans le cadre de l'évaluation de l'interface utilisateur est le nombre de fois où une intervention auprès d'un utilisateur a été requise. La nature de cette intervention (e.g. dysfonctionnement, erreur, difficulté à trouver un élément, interaction avec la scène) a également été notée. Le nombre d'interventions effectué en moyenne est de 1.75 fois par participant (16 participants) pour les participants ayant effectué l'expérience en personne. La nature de ces interventions a été classée par ordre de fréquence (du plus fréquent au moins fréquent). Ce classement est le suivant : interaction avec l'axe de temps ; interaction avec la demi-sphère de la densité de population ; erreur dans le questionnaire ; dysfonctionnement. Six participants ont jugé que l'axe de temps n'a pas été mis suffisamment en évidence. Ceci est particulièrement inquiétant puisque c'est une composante importante de la plateforme. À plusieurs reprises, il a été nécessaire d'intervenir auprès des utilisateurs afin de leur signifier qu'ils pouvaient se servir de l'axe de temps pour faire évoluer les éléments dans la scène, et ce même si la vidéo explicative montrait l'utilisation de l'axe de temps. Deux participants mentionnent ceci au sujet de l'axe de temps : « sans regarder la vidéo introductive, il faut savoir qu'il faut jouer avec la ligne de temps. » « [...] mettre la ligne du temps plus en évidence (en couleur, moins en retrait de l'écran, etc.) afin qu'on l'utilise plus intuitivement. » Trois participants ont également mentionné que l'axe de temps est complexe et pas toujours évident à utiliser. Plus spécifiquement, le réglage de la vitesse et la sélection de la période de temps à visualiser n'ont pas été bien compris pour ces participants. Six participants ont aussi eu de la difficulté à interagir avec la scène 3D, particulièrement avec la demi-sphère (relative à la densité de population) et les bâtiments 3D sous celle-ci. Les participants tentaient, sans succès, de sélectionner les bâtiments 3D se trouvant sous la demi-sphère. La raison est qu'ils devaient

aller à un niveau de zoom sous la demi-sphère pour pouvoir interagir avec le bâtiment 3D. C'est un principe hiérarchique de couches. Un peu comme en 2D, où il faut désactiver une couche supérieure pour accéder à celle juste en dessous. La même chose s'applique aussi avec la 3D. Deux participants ont buté sur des erreurs d'orthographe dans le questionnaire, menant à une fausse interprétation de la question. Trois participants ont fait face au même dysfonctionnement au cours de leur expérience. Ce dysfonctionnement causait une interruption de l'application (aussi appelé *crash* en anglais). On veut éviter des dysfonctionnements de ce genre, car ils forcent le participant à recommencer l'expérience. La source du bogue provenait du graphique. Certains participants avaient désactivé des couches spatiales (ex. pistes cyclables passées) au sein du graphique (fonctionnalité intégrée au graphique par défaut), mais continuaient d'utiliser l'axe de temps. Une erreur survenait donc dans le code de l'application, car « l'application » tentait d'ajouter une information à la couche désactivée du graphique. À la suite de cette découverte, les participants suivants ont été prévenus pour éviter qu'ils ne reproduisent ce dysfonctionnement. Le deuxième indicateur intervenant dans l'évaluation de l'expérience utilisateur est la durée moyenne de l'expérience. Pour les quatre premiers participants, celle-ci était de 1 heure et 10 minutes. Cette durée est loin de correspondre à la prédiction initiale de 25 minutes. Ainsi, pour pallier ce problème, les scénarios #1 et #2, ont été retirés de l'expérience étant donné qu'ils sont complémentaires au scénario #3. Ensuite, la durée moyenne pour réaliser l'expérience a été de 45 minutes.

L'affirmation #7 vise à évaluer les concepts UI et UX. Elle évalue si les introductions imposées à chaque début de question sont pertinentes. Cette affirmation a reçu une note moyenne de 6.6/10 avec un écart-type de 3.0 (cf. Tableau 9). Cela montre que généralement les participants ne sont « ni en accord, ni en désaccord » avec cette affirmation. De plus, la distribution des opinions est hétérogène avec un fort écart-type de 3.0 (cf. Figure 75). Lorsque nous analysons cette distribution, nous remarquons que la majorité des valeurs se trouvent entre 7 et 10. En effet, 14 valeurs sur 21 (66%) se trouvent entre 7 et 10 pour 7 valeurs sur 21 (34%) se retrouvant entre 0 et 6. On voit clairement la divergence des opinions.



Tableau 9 - Valeurs moyennes et écarts-types calculés sur la base du degré d'accord avec l'affirmation concernée par le UI et UX.

#	Question	Moyenne Sur 10	Écart-Type
<b>UI et UX</b>			
7	Les introductions à chaque début de question sont utiles, voire essentielles pour bien mettre en contexte.	6.6	3.0

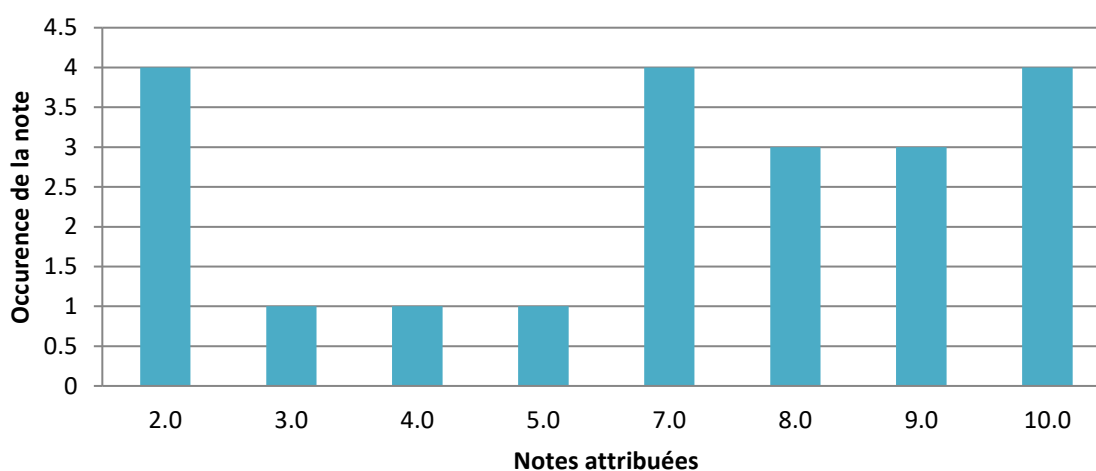


Figure 75 - Histogramme montrant la distribution des avis associés à l'affirmation #7 portant sur les introductions imposées à chaque scénario de consultation.

Pour mieux comprendre ces valeurs, l'analyse des commentaires a été réalisée. En général, les participants ont trouvé que les vidéos étaient pertinentes. Dans ce sens, un participant mentionne ceci « Elles permettent de nous mettre en contexte afin de nous aider à comprendre ce qu'il faut analyser. » Néanmoins, il faudrait offrir plus de contrôle au niveau de ces introductions. Un participant mentionne à cet effet : « Oui, elles sont pertinentes. Cependant, le participant devrait avoir le contrôle sur cette introduction. Autrement, il ne sait pas trop ce qu'il se passe. » Par contrôle, quatre participants ont mentionné offrir la capacité d'avancer ou de passer les introductions, notamment pour les participants plus expérimentés. Voici trois de

leur citation « [...] un utilisateur avancé n'a pas nécessairement besoin des introductions pour naviguer. Cela peut même nuire à son utilisation. » « Elles sont utiles. Il pourrait être pertinent de pouvoir les passer. » « Oui, mais il faudrait pouvoir les passer [...] ». D'autres participants mentionnent qu'elles ont besoin d'être améliorées au niveau conception pour alléger le guidage et réduire la durée. Ces améliorations seront davantage discutées dans la prochaine section.

Finalement, l'interface semble avoir été construite correctement pour un participant, car celui-ci mentionne : « J'aime beaucoup le design général : sobre, professionnel et moderne ! Beau travail. Félicitations ! Merci ! »

## **4.5 Discussion des résultats**

Les résultats permettent la validation des concepts mis de l'avant dans cette recherche. Nous cherchions à valider les choix de représentation et la combinaison 2D vs 3D; le mécanisme de simulation spatiotemporelle et ses composantes pour visualiser l'évolution des informations et pour analyser les impacts des choix réalisés; et certains aspects UI et UX.

Les tests montrent que la 3D n'est pas toujours meilleure pour communiquer l'information. Bien que la note attribuée au Tableau 7 mentionne que la 3D permet de mieux comprendre le contexte géographique que la 2D, l'analyse des commentaires émis à ce sujet apporte des précisions à cette note. Tout d'abord, il n'y a pas de doute qu'une 3D en termes de représentation et visualisation peut être plus intuitive dans certains cas que la 2D, par exemple au scénario #5 avec la construction de futurs bâtiments. Les bâtiments étaient représentés en 3D dans une forme naturelle sous deux niveaux d'abstraction réaliste et non réaliste. Au total 8 participants ont noté l'importance d'une représentation 3D pour ce scénario. Selon certaines études, on peut justifier l'importance d'une représentation 3D lorsque l'information communiquée à un équivalent 3D naturel dans le monde réel, car cela correspond au modèle mental du participant (ex. bâtiment)[30], [31], [32]. Or, puisque les bâtiments sont naturellement en 3D dans le monde réel, il s'avère plus intuitif de les représenter en 3D. Dans ce cas, la 3D est meilleure pour communiquer l'information. Néanmoins, dans d'autres cas, la

3D peut rendre la communication de l'information moins intuitive. Prenons le cas des pistes cyclables, un participant a cité qu'un environnement 3D (i.e. avec bâtiments 3D) pour visualiser des pistes cyclables 2D n'est pas utile voir même gênant. Selon [28], cela peut se justifier par le fait que les représentations cartographiques 2D traditionnelles telles définies par Bertin (1987), qui sont des abstractions de la réalité, sont rendues la norme chez les utilisateurs des outils cartographiques. Or, l'accessibilité à ce genre de représentations est plus importante aujourd'hui. Ces outils exploitent pour la plupart d'entre eux, la 2D comme dimension principale pour communiquer l'information. Il n'y a qu'à penser à Google Maps qui offre des visualisations de pistes cyclables en 2D, par exemple. Bien que ces représentations soient de plus en plus accessibles au grand public, il reste que l'échantillon utilisé était constitué essentiellement de géomaticiens qui apprennent ces normes dans leurs cours. En ce sens, il peut être naturel de préférer une représentation 2D pour les pistes cyclables à une représentation 3D. Donc, la 3D n'est pas toujours meilleure que la 2D en termes d'intuitivité. Nous savons maintenant que pour visualiser des pistes cyclables, il est préférable de rester dans un environnement 2D. D'ailleurs, pour la visualisation de la construction de bâtiments ou tout autre scénario mettant les bâtiments 3D au centre du sujet de la consultation, il est préférable d'utiliser un environnement 3D. Bien que nous sachons cela maintenant, il reste qu'il peut y avoir une multitude de scénarios de consultation citoyenne possibles, et donc cela m'amène à me poser la question suivante : Quand est-ce utilisé la 2D et quand utiliser la 3D lorsque l'on bâtit des scénarios dédiés à une consultation citoyenne? Finalement, nous avons fait l'hypothèse au départ, qu'une combinaison des dimensions 2D et 3D étaient complémentaires et meilleures que chaque dimension prise séparément. Or, d'après les résultats obtenus, on peut dire qu'une combinaison des deux dimensions est meilleure que chacune prise séparément, allant dans le sens des études suivantes [22], [34] et [35].

Certaines directives de représentation étaient adéquates et d'autres non. C'est le cas de l'animation 3D du NSC via l'utilisation d'un modèle urbain encodant une couleur par arrondissement et par année. Cette approche est intéressante, car elle bénéficie de la forme naturelle des bâtiments pour montrer un phénomène plus abstrait. Toutefois, elle est

dépendante de la qualité et la performance des bâtiments. Dans ce sens, la qualité du rendu correspond au niveau de détail du modèle utilisé (e.g. LoD1 vs LoD3). La performance des bâtiments correspond à la capacité à rendre plusieurs milliers de bâtiments sur le web de manière fluide et accessible. Nous avons utilisé 3DCityDB pour générer un tuilage 2D des bâtiments et Cesium comme plateforme de rendu. Néanmoins, nous avons fait face à des performances variables d'une machine à l'autre. En moyenne, la performance obtenue variait entre mauvaise et bonne. Le problème venait du fait que les bâtiments chargeaient au fur et à mesure. Ainsi, nous croyons que la performance liée aux bâtiments n'a pas permis d'apprécier certaines animations 3D, comme celle du NSC. Un remède à ce problème pourrait être les tuiles 3D de Cesium qui connaît actuellement du succès en matière de performance de rendu web.

Même si la présente recherche n'avait pas pour objectif d'étudier les niveaux de réalisme, nous avons offert la possibilité de basculer d'un style hautement réaliste à un style plus abstrait. Des études ont mis en évidence qu'un niveau hautement réaliste favorise l'acceptation du public et leur compréhension vis-à-vis du phénomène observé [16][21]. À l'opposé, d'autres études montrent que les représentations plus abstraites améliorent la performance de la visualisation en simplifiant le rendu des éléments visualisés. Donc, elles diminuent la complexité visuelle de la visualisation et peuvent être utilisées pour mettre l'accent sur des éléments d'intérêts [24]. Dans cette recherche, nous avons offert la possibilité de basculer d'un style de niveau de réalisme à un autre. Les bâtiments 3D et le fond de carte sont les éléments concernés par ces styles. On voulait vérifier si cette fonctionnalité permet de tirer les avantages liés à chaque niveau de réalisme. Les résultats ont montré que les participants ont généralement apprécié cette fonctionnalité. Donc, il semble que différents niveaux de réalisme peuvent combler les lacunes observées à chacun des niveaux. Néanmoins, quelques limites ont été identifiées. Premièrement, quatre participants ont mentionné que la fonctionnalité devra être mise plus en évidence. « [...] il faut avoir vu la vidéo explicative pour savoir qu'elle existe et à quoi elle correspond. Dans le cadre d'un vrai sondage avec des gens de tous horizons, je ne suis pas certain que tout le monde aurait exploité cette option. Il faudrait aussi quelque chose de plus rapide et intuitif à comprendre. » « Un citoyen ordinaire n'aurait pas eu

le réflexe de changer entre le style abstrait plus sombre et le style réaliste, je pense. » Deuxièmement, il faut être prudent pour ne pas doubler la surcharge de travail reliée à cette fonctionnalité, car cela pourrait rallonger le temps consacré au développement du prototype.

Il y a d'autres limites liées à la représentation et visualisation de l'information. Premièrement, la couleur a été grandement utilisée pour encoder l'information, toutefois elle peut être limitante pour certaines personnes (ex. daltoniens) dans un contexte plus participatif. À cet effet, il faudrait offrir la capacité de basculer d'une variable graphique telle que la couleur à une autre (i.e. utiliser une symbologie). La 3D peut aussi être limitante pour les personnes ne voyant pas la perspective. Deuxièmement, les directives de représentation spatiale conçues n'ont pas toutes été validées au cours des tests utilisateurs.

En ce qui concerne le mécanisme de simulation spatiotemporelle et le suivi des impacts des choix réalisés lors d'une consultation, les participants ont souligné son importance. Les résultats ont montré que le temps doit être intégré à toutes les plateformes web actuelles de participation citoyenne. À cet effet, un participant mentionne ceci : « Oui le temps est probablement un point majeur à conserver et même à ajouter à la carte. » Les résultats ont aussi montré que les simulations spatiotemporelles aident à mieux comprendre l'impact des choix réalisés lors d'une consultation citoyenne. Les participants ont trouvé que le graphique a été utile pour rapidement faire des liens entre les informations visualisées. Les animations ont été généralement appréciées des participants. Les résultats de cette recherche montrent également que les animations 3D ne sont pas plus intuitives que les animations 2D, car cela dépend avant tout de la dimension de représentation choisie pour une information spatiale. Normalement, en se basant sur les directives de représentation conçues dans cette recherche, la représentation choisie est la plus intuitive pour une information donnée. Ceci va dans le même sens que l'étude présentée dans [35], mentionnant que la 3D n'est pas significativement meilleure que la 2D en matière de représentation. Néanmoins, les résultats contredisent ce qu'avance [28] dans son étude, mentionnant que la 4D (3D plus temps) est la forme la plus intuitive pour représenter l'information spatiotemporelle.

Il y a quelques limites en matière d'intuitivité et d'utilisabilité reliées aux composantes du mécanisme. Premièrement, les trois interventions reliées à l'axe de temps montrent que celui-ci n'est pas suffisamment conviviale. Donc, il doit être simplifié et plus facilement accessible. La surbrillance ou l'utilisation d'infobulles sont des solutions proposées par deux participants pour mettre l'axe de temps plus en évidence. Deuxièmement, trois participants ont indiqué que le graphique devra être « minimisable » et « déplaçable ». Sinon, le graphique prend beaucoup de place dans la scène et contribue aux changements survenus lors des simulations. Troisièmement, l'animation basée sur le modèle urbain doit être améliorée pour permettre une meilleure évaluation de son apport. Dans ce sens, la performance du rendu des bâtiments 3D doit être améliorée. Bien que la Ville de Montréal ait fourni l'accès à plusieurs données spatiotemporelles (i.e. pistes cyclables passées, présentes et futures), il manquait des données avec de fines résolutions temporelles (e.g. secondes, minutes, heures, jours) détenant plusieurs pas de temps afin de pleinement apprécier les animations. Selon [90], le plein potentiel des animations est atteint lorsque de grandes séries temporelles sont utilisées. Dans le cas de cette recherche, nous avons au plus cinq pas de temps. Ceci revient à visualiser des diapositives au lieu d'animations. La différence entre les diapositives et les animations provient du nombre d'images par seconde, qui est respectivement 2 à 4 et de 15 à 25 [91].

Au niveau UI et UX, on ne peut pas dire que la plateforme est actuellement utilisable par des citoyens. Bien que quatre participants aient aimé l'interface de la plateforme pour son côté sobre et professionnel, il reste des améliorations à apporter. Les introductions imposées à chaque début de scénario sont pertinentes, mais elles doivent être améliorées. La première suggestion proposée par un participant consiste à améliorer les jeux de caméra durant l'introduction afin d'identifier plus simplement les informations spatiales concernées par le scénario. La deuxième amélioration consiste à offrir la capacité d'avancer ou de passer l'introduction. À cet effet, cinq participants ont mentionné cette option afin de passer l'introduction ou bien l'avancer plus rapidement. Une citation d'un participant va en ce sens : « Elles sont utiles. Il pourrait être pertinent de pouvoir les passer. » La dernière amélioration consiste à bloquer les commandes et à ajouter des textes explicatifs pour mieux guider et comprendre les informations qui sont montrées au travers de l'introduction. À cet effet, un

participant mentionne : « bloquer les commandes et ajouter un texte explicatif indiquant que c'est une introduction auraient peut-être été utile. » Le temps nécessaire pour réaliser l'expérience est trop long. Il faudra aussi réduire la longueur des tests effectués et poser des questions plus spécifiques. L'utilisation d'infobulles serait intéressante pour identifier les fonctionnalités offertes par la plateforme. La performance et la fluidité de la plateforme devront être bonifiées pour faciliter son utilisation.

On observe également des limites liées à la performance de la plateforme, particulièrement au niveau du rendu des bâtiments. Encore aujourd'hui, le rendu de milliers de bâtiments au sein d'une application Web sans affecter la performance globale constitue un défi. Google Earth offre une visualisation 3D de plusieurs villes et la performance atteinte est impressionnante. Nous croyons que pour cette raison, entre autres, les participants sont habitués d'avoir une bonne performance de base. Or, dans le cas de cette recherche, nous avons utilisé le système de tuilage de 3DCityDb pour rendre les bâtiments dans Cesium. En générale, la performance globale était bonne, en particulier pour les bâtiments non texturés, mais cela n'est rien à comparer ce qu'offre Google Earth. Ainsi, nous croyons que la performance des bâtiments a négativement affecté l'expérience des participants. Certaines visualisations étaient dépendantes des bâtiments. Par conséquent elles n'ont malheureusement pas pu être pleinement appréciées. Il existe des pistes de solution pour améliorer la performance des bâtiments au sein de la plateforme. Premièrement, l'option d'afficher seulement ce qui est nécessaire a été proposée par un participant. Ceci pourrait alléger la visualisation de l'information qui est montrée. De plus, cela pourrait réduire considérablement le nombre de requêtes asynchrones réalisées et donc augmenterait la performance. Deuxièmement, un participant mentionne qu'une structure CityGML<sup>15</sup> basée sur le LoD pourrait également être utilisée pour réduire les demandes machines, si le désir est d'afficher plusieurs bâtiments à la fois. Finalement, les tuiles 3D de Cesium constituent une voie d'amélioration. Les tuiles 3D

---

<sup>15</sup> CityGML : CityGML est un format de données ouvert standardisé et un format d'échange pour stocker des modèles 3D numériques de villes et de paysages. Il est implémenté en tant que schéma d'application pour GML3, et il s'agit d'une norme internationale officielle de l'OGC [128].

permettent le rendu de centaines de milliers de bâtiments avec une bonne performance globale. Les multiples démonstrations et exemples disponibles sur le site web de Cesium illustrent sa grande efficacité. Les outils de création et d'exploitation de tuiles 3D Cesium ne sont pas encore disponibles à l'heure actuelle.

Finalement, rappelons qu'il faut être prudent dans la généralisation des résultats à l'ensemble de la population, car les participants de cette recherche sont 1) relativement peu nombreux i.e. 21 au total et 2) ils sont généralement expérimentés avec les outils de cartographie web, ce qui diminue probablement sa validité externe.

## **4.6 Synopsis du chapitre**

Dans ce chapitre, nous cherchions à valider les choix de représentation et la combinaison 2D vs 3D; le mécanisme de simulation spatiotemporelle et ses composantes pour visualiser l'évolution des informations et pour analyser les impacts des choix réalisés; et certains aspects UI et UX. Les résultats ont révélé que la 3D n'est pas toujours meilleure que la 2D pour communiquer l'information. En effet, cela dépend avant tout des caractéristiques spatiales de l'information concernée par la visualisation ainsi que des connaissances du participants à l'égard de la représentation graphique de cette information. Par exemple, les pistes cyclables sont généralement représentées en 2D au sein des plateformes actuelles, or elles sont mieux représentées en 2D qu'en 3D. D'un autre côté, les bâtiments sont des objets naturellement bien représentés en 3D. Dans ce contexte, cela montre qu'une combinaison des représentations 2D et 3D est meilleure que chacune prise séparément. Certaines directives de représentation ont semé la confusion auprès des participants. Par exemple, le niveau de satisfaction citoyenne représenté par des bâtiments 3D doit être amélioré et réévalué au moyen de tests utilisateurs. En ce qui concerne le mécanisme de simulation spatiotemporelle et le suivi des impacts des choix réalisés lors d'une consultation, les participants ont souligné son importance. En effet selon les résultats, le temps doit être intégré à toutes les plateformes web actuelles de participation citoyenne. Du point de vue UI et UX, on ne peut pas dire que la plateforme est actuellement utilisable par des citoyens. Il faut apporter des modifications à la plateforme afin



de favoriser son utilisation par le grand public. L'extension 3DCityDB pour Cesium a permis de rendre des bâtiments CityGML dans Cesium grâce à un système de tuilage 2D. Néanmoins, ce système de tuilage atteint sa limite en matière de performance lorsqu'une grande quantité de bâtiments est rendue, i.e. plus grand 2000 bâtiments. Au-delà d'un certain nombre de bâtiments, la performance de l'application web est largement réduite, par conséquent l'expérience utilisateur est affectée négativement. De plus, les bâtiments chargeaient au fur et à mesure que l'utilisateur se déplaçait dans la scène, ce qui contribuait à la surcharge cognitive des simulations spatiotemporelles. Quant au mécanisme de simulation spatiotemporelle, l'axe de temps doit être mis plus en évidence. Enfin, même si la présente recherche n'avait pas pour objectif spécifique d'étudier les niveaux de réalisme, les résultats ont montré que la fonctionnalité pour basculer d'un niveau de réalisme à un autre a été appréciée des participants. Toutefois, il faut évaluer plus systématiquement la valeur ajoutée de cette fonctionnalité, par exemple le temps requis pour la développer par opposition aux bénéfices engendrés au d'un point de vue participatif.

# Conclusion

*Cette partie rappelle dans un premier temps les objectifs de cette recherche et comment ils ont été atteints. Ensuite, il énonce les contributions principales de cette recherche. Finalement, cette partie se conclut en énonçant les perspectives de recherche.*

## 1.1 Retour sur les objectifs du projet et la recherche effectuée

L'objectif général de notre recherche était de concevoir et développer une plateforme cartographique web de participation citoyenne combinant des visualisations multidimensionnelles (2D, 3D, 4D) de manière intuitive, afin que les citoyens puissent mieux évaluer et comprendre les enjeux de la consultation. Trois sous-objectifs ont été proposés afin d'atteindre l'objectif général. Ceux-ci vont être passés en revue dans les prochains paragraphes en soulignant les résultats auxquels ils ont abouti.

Le premier sous-objectif visait l'étude des approches de représentation 2D/3D des informations spatiales partagées au sein d'une consultation citoyenne pour aboutir à des directives de représentation adaptées à la consultation elle-même. Pour atteindre cet objectif, une revue de littérature a été réalisée sur plus de 60 articles. Les domaines de recherche qui ont été étudiés au travers de cette revue étaient la vision par ordinateur, les cartographies numériques et web. À la suite de cette revue, des approches de représentation 2D et 3D ont été retenues. Ces approches ont ensuite été confrontées à des critères reliés à la problématique de la consultation citoyenne, i.e. des critères d'intuitivité et d'accessibilité. D'une part, les critères d'intuitivité faisaient référence à l'intuitivité des représentations spatiales choisies (i.e. étaient-elles adaptées au grand public?). Ainsi, les critères qui ont été retenus sont : la complexité visuelle et la surcharge cognitive. D'autre part, les critères d'accessibilité étaient liés à la complexité de l'algorithme de représentation ainsi qu'à la puissance de l'appareil de visualisation. Les résultats issus de cette analyse multicritères ont permis d'aboutir à des

directives de représentation appliquées à une consultation citoyenne. Le premier sous-objectif ciblait également le recensement et la comparaison des technologies cartographiques web de rendu 2D et/ou 3D. Seules les technologies répondant aux exigences de ce projet de recherche ont été retenues. Le globe virtuel Cesium est la technologie principale qui a été retenue pour ce projet de recherche.

Le deuxième sous-objectif consistait à concevoir un mécanisme de simulation spatiotemporelle 2D/3D adapté à une consultation citoyenne. Pour atteindre cet objectif, une revue de littérature a été effectuée pour recenser les plateformes actuelles web de participation citoyenne intégrant des simulations spatiotemporelles. Nous avons très vite constaté le peu d'articles scientifiques publiés sur le sujet. Par conséquent, cette partie a été complétée avec des plateformes web 4D non appliquées à la participation citoyenne. Le tour d'horizon effectué sur ce domaine a permis d'identifier les parties intégrantes du mécanisme de simulation spatiotemporelle, soit : la requête, l'axe de temps linéaire, l'animation et le graphique. Le requête a été identifié comme utile pour sélectionner la période de temps à visualiser. Nous avons jugé le temps linéaire plus intuitif et simple à comprendre pour le grand public, par conséquent nous avons choisi l'axe de temps linéaire. Quant aux animations et graphiques, ils ont été choisis pour représenter les informations à caractère évolutif partagées au sein d'une consultation citoyenne et leurs impacts. Comme le soulignent [109], les animations sont efficaces pour clairement communiquer des changements. Trois types de changements intervenant au sein d'une animation ont été identifiés. Il s'agit des changements existentiels, spatiaux et sémantiques. Ces trois types de changement ont été intégrés au sein d'un diagramme. Ce diagramme est une illustration des directives de simulation spatiotemporelle. Or, en fonction du changement visé, ce diagramme guide l'utilisateur vers une représentation spatiotemporelle. Il est nécessaire au préalable que l'information ait été associée à une directive de représentation spatiale. Or, l'utilisateur peut se servir du diagramme conçu à cet effet à la fin du chapitre 1. Concernant le graphique, il a été identifié comme étant la forme la plus simple et la plus utilisée dans le monde de la visualisation [90]. C'est pourquoi il a été proposé conjointement à l'animation spatiotemporelle. Enfin, les parties

intégrantes du mécanisme ont été disposées au sein d'un prototype d'interface pour le développement de la plateforme.

Le troisième sous-objectif consistait à valider les propositions conceptuelles proposées aux sous-objectifs 1 et 2. À cet effet, un prototype de plateforme cartographique web de participation citoyenne a été réalisé. Ce prototype a intégré cinq scénarios de consultation citoyenne, chacun mettant en œuvre des directives de représentation spatiale et/ou temporelle. La thématique qui a été associée aux scénarios est celle de l'aménagement urbain, car celle-ci met en relation les dimensions spatiale et temporelle. Les concepts inhérents aux scénarios ont été validés au moyen de tests utilisateurs et de participants. L'architecture générale du prototype repose sur deux parties : le côté serveur et le côté client. Les principales technologies côté serveur qui ont été utilisées sont Node.js, MongoDB, et le module Express.js. Concernant le côté client, les technologies qui ont été utilisées sont Cesium, Highchart (pour les graphiques) et les technologies web classiques soit JavaScript, CSS et HTML. L'architecture est constituée de deux composantes : la 3D et le mécanisme de simulation spatiotemporelle. La 3D réfère aux bâtiments 3D du prototype et ces derniers ont été produits avec 3DCityDB et rendus avec Cesium. Le mécanisme de simulation spatiotemporelle a été construit en partie grâce aux fonctionnalités d'horloge et de ligne de temps offertes par Cesium. Lors de la validation des scénarios au moyen de tests utilisateurs, trois des cinq scénarios ont été retenus, car la durée de l'expérience s'est avérée trop longue dépassant les prédictions préliminaires. Ces trois scénarios étaient néanmoins suffisants pour valider les concepts relatifs à cette recherche. Les résultats issus des tests utilisateurs ont permis de confirmer que les directives de représentation mises en œuvre dans cette recherche sont généralement applicables et intuitives. Les résultats aussi ont révélé que la 3D n'est pas toujours meilleure que la 2D pour communiquer l'information. En effet, cela dépend avant tout des caractéristiques spatiales de l'information concernée par la visualisation ainsi que des connaissances du participants à l'égard de la représentation graphique de cette information. Par exemple, les pistes cyclables sont généralement représentées en 2D au sein des plateformes actuelles, or elles sont mieux représentées en 2D qu'en 3D. D'un autre côté, les bâtiments sont des objets naturellement bien

représentés en 3D. De plus, les participants ont jugé que le mécanisme permet de bien comprendre les enjeux engendrés par les choix réalisés lors d'une consultation citoyenne.

On peut donc conclure que les trois sous-objectifs de cette recherche ont été complétés, par conséquent l'objectif général de cette recherche est atteint. De plus, les résultats permettent la validation des concepts mis de l'avant dans cette recherche. L'analyse des données a révélé que les informations spatiales partagées au sein d'une consultation citoyenne peuvent être représentées grâce à une combinaison des dimensions 2D, 3D et temps.

On considère également que la plateforme proposée dans le présent projet est un bon pas vers un outil plus complet et plus dédié à la participation citoyenne. Nous pensons que ce type d'outil pourrait augmenter l'objectivité des réponses issues des processus de consultation, conduisant ainsi à de meilleures décisions.

## **1.2 Contributions à la recherche**

Les contributions de ce projet de recherche sont nombreuses. Tout d'abord, notre recherche indique qu'il y a absence de directives dans la littérature concernant la représentation de l'information spatiale adaptée au grand public. Par conséquent, le présent projet de recherche a contribué à combler cette absence en proposant des directives de représentation 2D/3D dédiées au contexte d'une consultation citoyenne. Nous croyons que ces directives de représentation constituent une première étape vers des directives de plus en plus adaptées à la participation citoyenne.

Deuxièmement, nous avons étudié plus en profondeur les simulations spatiotemporelles 2D/3D au sein des cartographies web dynamiques, tel qu'il a été suggéré par [54]. Notre recherche confirme que le temps est une composante peu investiguée dans le domaine de la cartographie web, en particulier lorsqu'appliquée à la participation citoyenne. En effet, on trouve très peu d'articles scientifiques qui ont été publiés sur le sujet. Dans ce projet de recherche, nous contribuons à ce domaine de recherche en proposant, basés sur la littérature, un mécanisme de simulation spatiotemporelle 2D/3D.

Troisièmement, un prototype cartographique web de participation citoyenne a été mis en place et il est accessible à l'adresse suivante : [www.emontrealmap.ca](http://www.emontrealmap.ca). Ce prototype montre qu'une plateforme web de participation citoyenne peut être réalisée à l'aide de ressources gratuites et libres d'accès. Comme il a été mentionné plus tôt, il y a une présence très limitée de plateformes de participation citoyenne intégrant des simulations spatiotemporelles. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'on regarde des plateformes intégrant des simulations 4D. Donc, notre plateforme contribue aussi à l'avancement des connaissances dans ce domaine. Pour être plus spécifique, la plateforme contribue à la construction de lignes directrices en matière d'utilisabilité pour la cartographie dynamique, lacune aussi identifiée par [54] et [74]. Bien que l'objectif principal de cette recherche ne fût pas d'étudier l'utilisabilité des plateformes web 4D adaptées au grand public, les quelques résultats obtenus en matière d'UI et UX montrent des éléments d'utilisabilité intéressants. Par exemple, l'axe de temps doit être simplifié pour faciliter son utilisation. De plus, il doit être mis davantage en évidence et la surbrillance ou l'utilisation d'infobulles sont des avenues intéressantes. Des visites guidées et explicatives pour mettre en contexte les éléments spatiaux concernés par une consultation citoyenne sont pertinentes, mais elles doivent rester simples, relativement de courtes durées et offrir la capacité de l'avancer ou de la passer. L'option de changements de niveaux de réalisme est une fonctionnalité qui a été appréciée des participants ayant pris part à l'évaluation des concepts de cette recherche. Néanmoins, elle doit être mise en évidence pour montrer aux participants qu'elle existe.

Finalement, ce projet de recherche a contribué à enrichir les connaissances sur la géovisualisation et les solutions appliquées à la participation citoyenne. Nous avons déjà partagé nos travaux à la communauté scientifique et envisageons de poursuivre dans cette voie. Le présent projet de recherche a été présenté aux congrès *64th Annual North American Meetings of the Regional Science Association International (NARSC 2017)* tenu à Vancouver ainsi que la conférence régionale de l'Association géographique internationale (UGI) - Réunion annuelle de l'Association canadienne des géographes (ACG) à la ville de Québec.

Les contributions scientifiques actuelles sont énumérées ci-dessous :

- Lafrance, F., Daniel, S. & Mellouli, S. 2017. Towards a time-dynamic 2D / 3D web mapping platform adapted to citizen participation. 64th Annual North American Meetings of the Regional Science Association International, Special session on GeoComputation, Vancouver.
- Marzouki, A., Lafrance, F., Mellouli, S. & Daniel, S. 2017. The relevance of geovisualization in Citizen Participation processes. 18th International Conference on Digital Government Research, ACM Press, New York.

### 1.3 Perspective

Le prototype, dans son état actuel, nécessite des améliorations afin de permettre son utilisation dans un contexte participatif réel. Ainsi, nous visons à apporter une série d'améliorations tant au niveau de l'interface utilisateur que des scénarios de consultation citoyenne. Une amélioration directe pouvant être apportée au prototype concerne la performance et le rendu des bâtiments 3D. Les tuiles 3D de Cesium semblent être une avenue prometteuse afin de régler les problèmes liés à la performance et au chargement des bâtiments 3D. Il nécessite de dire que dans le cadre de cette recherche, les travaux ont été réalisés et testés sur un ordinateur, mais non sur une tablette ou encore un téléphone intelligent. Ces appareils possèdent des capacités machines plus limitées que l'ordinateur, or il sera intéressant d'évaluer la performance obtenue sur ces appareils afin d'adapter la solution au besoin. De plus, ces appareils possèdent des écrans plus petits, par conséquent l'interface devra être ajusté. D'autres améliorations concernent les introductions imposées à chaque début de scénario ainsi que de la mise en évidence des fonctionnalités offertes par la plateforme. La durée des introductions sera réduite et des textes explicatifs seront ajoutés afin d'agrémenter les informations mises en contexte. Lors de la première visite du participant, des infobulles seront utilisées pour guider le participant au travers des fonctionnalités offertes par la plateforme (e.g. axe de temps, changement de style de niveau de réalisme). Les questions posées au travers des scénarios seront plus spécifiques et la quantité d'informations spatiales visualisées sera réduite. À la suite de ces améliorations, des tests utilisateurs pourront avoir lieu afin de réévaluer, entre autres, certaines directives de représentation qui n'ont pas été évaluées ou bien qui ont semé de la confusion auprès des participants. Ceci permettra de valider si ces directions sont applicables ou non à une consultation citoyenne. Même si la présente recherche n'avait

pas pour objectif d'étudier les niveaux de réalisme, nous avons offert la fonctionnalité de basculer d'un style hautement réaliste à un style plus abstrait. Nous avons donc délimité quelques avenues de recherche intéressantes reliées à cette fonctionnalité : 1) Évaluer la valeur ajoutée d'une telle fonctionnalité selon le contexte de la visualisation. 2) Établir des directives pour savoir quels niveaux de réalisme choisir en fonction du contexte de la visualisation. 3) Combien faut-il de niveaux de réalisme? 4) Quels éléments spatiaux ont besoin de différents niveaux de réalisme.

La question d'utiliser la 2D ou la 3D pour représenter l'information spatiale demeure actuelle. Nous avons noté que pour la représentation de bâtiments une représentation 3D était intuitive et au contraire pour les pistes cyclables la 2D était meilleure. Néanmoins, ce constat s'applique seulement à deux informations. Pour la suite, il y a une nécessité de poursuivre le travail pour aboutir à des lignes guidées permettant de savoir quand utiliser la 2D et quand utiliser la 3D lorsque l'on bâtit des scénarios dédiés à une consultation citoyenne.

Au niveau des directives de représentation, deux éléments peuvent être améliorés dans le futur. Le premier consiste à vérifier, de manière plus systématique, s'il existe des directives de représentation permettant d'améliorer et même de renforcer les directives proposées dans cette recherche. Le deuxième élément concerne la conception des directives de représentation proposées au niveau du type d'appareil utilisé. En effet, les directives ont été conçues en considérant l'ordinateur seulement et non d'autres types d'appareil comme le téléphone intelligent et la tablette. Dans un contexte de participation citoyenne, les citoyens peuvent être amenés à utiliser différents types d'appareils. Or, des travaux doivent être menés afin d'évaluer les adaptations requises pour que les directives de représentation tiennent compte de divers appareils pour répondre au contexte et aux contraintes de la participation citoyenne. Dans un même ordre d'idées, un axe intéressant de recherche qui pourrait être exploré consiste à adapter la représentation cartographique de l'information en prenant compte des connaissances et des fonctions cognitives du participant. L'intelligence artificielle et les algorithmes d'apprentissage machine, axes de recherche présentement populaires, pourraient être explorés dans ce contexte.



Les tests utilisateurs réalisés dans cette recherche ont été faits avec des participants majoritairement expérimentés. Ainsi, il sera intéressant de refaire les tests avec un échantillon plus représentatif de la population. Cela servira à renforcer les concepts liés à la participation citoyenne mis en œuvre dans cette recherche. À cet effet, des démarches sont en cours afin d'utiliser le prototype dans le contexte d'une consultation citoyenne réelle. Ce cas réel de consultation citoyenne sera réalisé conjointement aux travaux d'une collègue au doctorat (i.e. Amal Marzouki). Ce projet de recherche ouvre également d'autres portes nécessitant d'être ouvertes. Comme suggèrent les chercheurs [54] dans leurs travaux, il y a un besoin criant de définir des variables graphiques pour la 3D et la 4D (3D plus temps), des stratégies pour optimiser la coloration dynamique (i.e. *dual coding*), et le développement de directives pour le côté UI et UX des applications cartographiques 3D/4D. Comme l'indique [54] dans ses travaux, le domaine de la sémiologie 3D pour les villes, les paysages, et les montagnes ont déjà été couverts par [24] et ils ont en effet identifié des variables graphiques, des techniques d'abstraction pour améliorer la performance et diminuer la complexité visuelle, en plus de techniques d'interaction. Mais ces objets restent tangibles et naturellement bien perçus. Toutefois, les approches de représentation 4D de phénomènes invisibles comme l'évolution d'opinions citoyennes ou de la densité de population restent quasi intouchées. Dans ce sens, trouver des approches de représentation 3D/4D pour nos scénarios n'a pas été facile. La revue de littérature effectuée (cf. Chapitre 1) montre à quel point il y a peu d'approches de représentation 3D/4D. En fait, la plupart des méthodes analysées étaient polyvalentes et aucune n'était spécifiquement conçue pour des variables telles que la densité de population ou bien des opinions citoyennes. Le domaine du jeu vidéo est une avenue intéressante pour trouver des idées inspirantes en matière de représentation 3D/4D. Ainsi, il serait intéressant de croiser les domaines du jeu vidéo et de la cartographie web 4D afin de valider certaines représentations déjà utilisées et acceptées dans le domaine du jeu vidéo.

## Bibliographie

- [1] J. Bryson, K. S. Quick, C. S. Slotterback, and B. C. Crosby, “Designing Public Participation Process,” *Public Adm. Rev.*, vol. 73, no. 1, pp. 23–34, 2012.
- [2] J. D. Salter, C. Campbell, M. Journey, and S. R. J. Sheppard, “The digital workshop: Exploring the use of interactive and immersive visualisation tools in participatory planning,” *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 6, pp. 2090–2101, 2009.
- [3] K. Al-Kodmany, “Public participation: Technology and democracy,” *J. Archit. Educ.*, vol. 53, no. 4, pp. 220–228, 2000.
- [4] F. Molinari, “On sustainable eParticipation,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 6229 LNCS, pp. 126–139, 2010.
- [5] T. Nabatchi, “Putting the ‘Public’ Back in Public Values Research: Designing Public Participation to Identify and Respond to Public Values,” *Kupa.Ku.Edu*, vol. 72, no. 315, pp. 699–708, 2010.
- [6] A. Macintosh and A. Whyte, “Towards an evaluation framework for eParticipation,” *Transform. Gov. People, Process Policy*, vol. 2, no. 1, pp. 16–30, 2008.
- [7] E. Panopoulou, E. Tambouris, and K. Tarabanis, “eParticipation initiatives : How is Europe progressing ?,” *Eur. J. ePractice*, no. March, pp. 1–12, 2009.
- [8] K. Al-Kodmany, “Visualization Tools and Methods in Community Planning: From Freehand Sketches to Virtual Reality,” *J. Plan. Lit.*, vol. 17, no. 2, pp. 189–211, 2002.
- [9] R. Kingston, “Public Participation in Local Policy Decision-making: The Role of Web-based Mapping,” *Cartogr. Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 138–144, 2007.
- [10] S. Smith and E. Dalakiouridou, “Contextualising Public (e)Participation in the Governance of the European Union,” *Gov. An Int. J. Policy Adm.*, vol. 7, no. March, pp. 1–11, 2009.
- [11] A. C. Freschi, R. Medaglia, and J. Nørbjerg, “A tale of six countries: eParticipation research from an administration and political perspective,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5694 LNCS, pp. 36–45, 2009.

- [12] K. Al-Kodmany, "Visualization tools and methods for participatory planning and design," *J. Urban Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 1–37, 2001.
- [13] C. Sanford and J. Rose, "Characterizing eParticipation," *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 27, no. 6, pp. 406–421, 2007.
- [14] S. Daniel and M.-A. Doran, "geoSmartCity," *Proc. 14th Annu. Int. Conf. Digit. Gov. Res. - dg.o '13*, p. 65, 2013.
- [15] H. Wu, Z. He, and J. Gong, "A virtual globe-based 3D visualization and interactive framework for public participation in urban planning processes," *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 34, no. 4, pp. 291–298, 2010.
- [16] J. Dambruch and M. Krämer, "Leveraging public participation in urban planning with 3D web technology," in *Proceedings of the Nineteenth International ACM Conference on 3D Web Technologies - Web3D '14*, 2014, no. December 2017, pp. 117–124.
- [17] M. A. Brovelli, P. Hogan, G. Prestifilippo, and G. Zamboni, "Multidimensional virtual globe for geo big data visualization," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 41, no. June, pp. 563–566, 2016.
- [18] M. A. Brovelli, C. E. Kilsedar, and G. Zamboni, "Visualization of VGI data through the new NASA Web World Wind virtual globe," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 41, pp. 205–209, 2016.
- [19] M. A. Brovelli, M. Minghini, and G. Zamboni, "Participatory GIS: Experimentations for a 3D social virtual globe," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. XL-2/W2, no. April 2014, pp. 13–18, 2013.
- [20] M. A. Brovelli, M. Minghini, and G. Zamboni, "Public participation in GIS via mobile applications," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 114, pp. 306–315, 2016.
- [21] Y. Hu, Z. Lv, J. Wu, K. Janowicz, X. Zhao, and B. Yu, "A multistage collaborative 3D GIS to support public participation," *Int. J. Digit. Earth*, vol. 8, no. 3, pp. 212–234, 2013.
- [22] W. Aigner, S. Miksch, W. Müller, H. Schumann, and C. Tominski, "Visualizing time-oriented data-A systematic view," *Comput. Graph.*, vol. 31, no. 3, pp. 401–409, 2007.
- [23] B. Mericskay, S. Roche, J. Thierry, and M. Guy, "Cartographie en ligne et planification participative : analyse des usages du géoweb et d'Internet dans le débat public à travers le cas de la Ville de Québec," Université Laval, 2013.
- [24] A. Semmo, M. Trapp, M. Jobst, and J. Doellner, "Cartography-Oriented Design of 3D Geospatial Information Visualization - Overview and Techniques," *Cartogr. J. - Spec. Issue, May 2015*, vol. 52, no. 2, pp. 95–106, 2015.

- [25] S. Dubel, M. Rohlig, H. Schumann, and M. Trapp, “2D and 3D presentation of spatial data: A systematic review,” *2014 IEEE VIS Int. Work. 3DVis, 3DVis 2014*, no. November, pp. 11–18, 2015.
- [26] A. Marzouki, F. Lafrance, S. Daniel, and S. Mellouli, “The relevance of geovisualization in Citizen Participation processes,” *Proc. 18th Annu. Int. Conf. Digit. Gov. Res. - dg.o '17*, pp. 397–406, 2017.
- [27] A. M. Maceachren, M. Wachowicz, R. Edsall, D. Haug, and R. Masters, “Constructing knowledge from multivariate spatiotemporal data: integrating geographical visualization with knowledge discovery in database methods,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 13, no. 4, pp. 311–334, Jun. 1999.
- [28] B. Resch, R. Wohlfahrt, and C. Wosniok, “Web-based 4D visualization of marine geo-data using WebGL,” *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 41, no. 3, pp. 235–247, 2014.
- [29] J.-D. Fekete, J. J. Wijk, J. T. Stasko, and C. North, *The Value of Information Visualization BT - Information Visualization*, vol. 4950, no. Chapter 1. 2008.
- [30] L. Yin and N. Shiode, “3D spatial-temporal GIS modeling of urban environments to support design and planning processes,” *J. Urban. Int. Res. Placemaking Urban Sustain.*, vol. 7, no. 2, pp. 1–18, 2014.
- [31] N. Shiode, “in the digital of urban 3D urban models : Recent developments modelling in three-dimensions environments,” *GeoJournal*, vol. 52, no. 3, pp. 263–269, 2000.
- [32] L. Yin, “Integrating 3D visualization and GIS in planning education,” *J. Geogr. High. Educ.*, vol. 34, no. 3, pp. 419–438, 2010.
- [33] G. Sun, Y. Liu, W. Wu, R. Liang, and H. Qu, “Embedding temporal display into maps for occlusion-free visualization of spatio-Temporal data,” *IEEE Pacific Vis. Symp.*, pp. 185–192, 2014.
- [34] M. Tory, A. E. Kirkpatrick, M. S. Atkins, and T. Moller, “Visualization task performance with 2D, 3D, and combination displays,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 12, no. 1, pp. 2–13, 2006.
- [35] E. Kaya, M. T. Eren, C. Doger, and S. S. Balcisoy, “Do 3D Visualizations Fail? An Empirical Discussion on 2D and 3D Representations of the Spatio-temporal Data,” *IEEE Sci. Vis.*, pp. 2–3, 2014.
- [36] J. Béjar *et al.*, “Discovery of spatio-temporal patterns from location-based social networks,” *J. Exp. Theor. Artif. Intell.*, vol. 28, no. 1–2, pp. 313–329, Mar. 2016.
- [37] N. Ferreira, J. Poco, H. T. Vo, J. Freire, and C. T. Silva, “Visual Exploration of Big Spatio-Temporal Urban Data : A Study of New York City Cab Trips,” *IEEE Trans. Vis.*

- Comput. Graph.*, vol. 19, no. 12, pp. 2149–2158, 2013.
- [38] H. Gao, J. Tang, X. Hu, and H. Liu, “Exploring temporal effects for location recommendation on location-based social networks,” *Proc. 7th ACM Conf. Recomm. Syst. - RecSys '13*, pp. 93–100, 2013.
- [39] Hanan Samet, “Reading News with Maps by Exploring Spatial Synonyms,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [40] T. Hengl, P. Roudier, D. Beaudette, and E. Pebesma, “{plotKML}: scientific visualization of spatio-temporal data,” *J. Stat. Softw.*, vol. 63, no. 5, p. e1, 2015.
- [41] R. Krueger, D. Thom, and T. Ertl, “Semantic Enrichment of Movement Behavior with Foursquare—A Visual Analytics Approach,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 21, no. 8, pp. 903–915, Aug. 2015.
- [42] J. H. Kwakkel, S. Carley, J. Chase, and S. W. Cunningham, “Visualizing geo-spatial data in science, technology and innovation,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 81, no. 1, pp. 67–81, 2014.
- [43] A. C. D. Lee and C. Rinner, “Visualizing urban social change with Self-Organizing Maps: Toronto neighbourhoods, 1996-2006,” *Habitat Int.*, vol. 45, no. P2, pp. 92–98, 2015.
- [44] S. Liu, W. Cui, Y. Wu, and M. Liu, “A survey on information visualization: recent advances and challenges,” *Vis. Comput.*, vol. 30, no. 12, pp. 1373–1393, 2014.
- [45] E. Mac Aoidh, M. Bertolotto, and D. C. Wilson, “Understanding geospatial interests by visualizing map interaction behavior,” *Inf. Vis.*, vol. 7, no. 3, pp. 275–286, 2008.
- [46] G. McKenzie, K. Janowicz, S. Gao, J.-A. Yang, and Y. Hu, “POI Pulse: A Multi-granular, Semantic Signature-Based Information Observatory for the Interactive Visualization of Big Geosocial Data,” *Cartographica*, vol. 50, no. 2, pp. 71–85, 2015.
- [47] S. E. Middleton, L. Middleton, and S. Modafferi, “Real-time crisis mapping of natural disasters using social media,” *IEEE Intell. Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 9–17, 2014.
- [48] S. E. Middleton and V. Krivcovs, “Geoparsing and Geosemantics for Social Media: Spatiotemporal Grounding of Content Propagating Rumors to Support Trust and Veracity Analysis During Breaking News,” *ACM Trans. Inf. Syst.*, vol. 34, no. 3, p. 16:1--16:26, 2016.
- [49] A. Noulas, S. Scellato, C. Mascolo, and M. Pontil, “Exploiting Semantic Annotations for Clustering Geographic Areas and Users in Location-based Social Networks,” *Soc. Mob. Web*, pp. 32–35, 2011.

- [50] P. Shanbhag, P. Rheingans, and M. Des Jardins, “Temporal visualization of planning polygons for efficient partitioning of geo-spatial data,” *Proc. - IEEE Symp. Inf. Vis. INFO VIS*, no. September 2014, pp. 211–218, 2005.
- [51] C. Xia, R. Schwartz, K. Xie, and A. Krebs, “CityBeat: real-time social media visualization of hyper-local city data,” *Proc. Int. World Wide Web Conf. Committee*, pp. 167–170, 2014.
- [52] T. Alatalo, M. Pouke, T. Koskela, T. Hurskainen, C. Florea, and T. Ojala, “Two real-world case studies on 3D web applications for participatory urban planning,” in *Proceedings of the 22nd International Conference on 3D Web Technology - Web3D '17*, 2017, pp. 1–9.
- [53] I. B. Arpinar, E. L. Usery, and M. Azami, “Geospatial Ontology Development and Semantic Analytics,” vol. 10, no. 4, pp. 551–575, 2006.
- [54] R. Bernd, H. Florian, R. Andreas, and S. Wolfgang, “Towards 4D Cartography – Four-dimensional Dynamic Maps for Understanding Spatio-temporal Correlations in Lightning Events,” *Cartogr. J.*, vol. 50, no. 3, pp. 266–275, 2013.
- [55] A. Bulbul and R. Dahyot, “Social media based 3D visual popularity,” *Comput. Graph.*, vol. 63, pp. 28–36, Apr. 2017.
- [56] S. Buschmann, M. Trapp, and J. Döllner, “Animated visualization of spatial–temporal trajectory data for air-traffic analysis,” *Vis. Comput.*, vol. 32, no. 3, pp. 371–381, 2016.
- [57] K. Chaturvedi, Z. Yao, and T. H. Kolbe, “Web-based Exploration of and Interaction with Large and Deeply Structured Semantic 3D City Models using HTML5 and WebGL,” *DGPF Tagungsband 24*, pp. 296–306, 2015.
- [58] C. Chen, F. Shi, K. Okuoka, and H. Tanikawa, “The Metabolism Analysis of Urban Building by 4d-GIS – A Useful Method for New-type Urbanization Planning in China,” *Univers. J. Mater. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 40–46, Mar. 2016.
- [59] B. De Roo, J. Bourgeois, and P. De Maeyer, “Usability Assessment of a Virtual Globe-Based 4D Archaeological GIS,” 2017, pp. 323–335.
- [60] A. Evans, M. Romeo, A. Bahrehmand, J. Agenjo, and J. Blat, “3D graphics on the web: A survey,” *Comput. Graph.*, vol. 41, pp. 43–61, 2014.
- [61] E. Gordon and G. Koo, “Placeworlds: Using Virtual Worlds to Foster Civic Engagement,” *Sp. Cult.*, vol. 11, no. 3, pp. 204–221, 2008.
- [62] H. Guo, X. Li, W. Wang, Z. Lv, C. Wu, and W. Xu, “An event-driven dynamic updating method for 3D geo-databases,” *Geo-spatial Inf. Sci.*, vol. 5020, no. June, pp. 1–8, 2016.

- [63] C. Helbig, "Concept and Workflow for 3D Visualization of Multifaceted Meteorological Data," no. November 1984, 2015.
- [64] L. Herman and T. Řezník, "3D web visualization of environmental information - Integration of heterogeneous data sources when providing navigation and interaction," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 40, no. 3W3, pp. 479–485, 2015.
- [65] Y. Hu, J. Wu, Z. Lv, H. Zhong, and B. Yu, "A method for representing thematic data in three-dimensional GIS," *2010 18th Int. Conf. Geoinformatics, Geoinformatics 2010*, no. 07, 2010.
- [66] P. Ivson, D. Nascimento, W. Celes, and S. D. Barbosa, "CasCADe: A Novel 4D Visualization System for Virtual Construction Planning," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 24, no. 1, pp. 687–697, Jan. 2018.
- [67] A. Konde and S. Saran, "Web enabled spatio-temporal semantic analysis of traffic noise using CityGML," vol. 11, no. 2, pp. 248–259, 2017.
- [68] X. Li, Z. Lv, B. Zhang, W. Wang, S. Feng, and J. Hu, "WebVRGIS Based City Bigdata 3D Visualization and Analysis," pp. 3–4, Apr. 2015.
- [69] A. Lovett, K. Appleton, B. Warren-Kretzschmar, and C. Von Haaren, "Using 3D visualization methods in landscape planning: An evaluation of options and practical issues," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 142, pp. 85–94, 2015.
- [70] Z. Lv, X. Li, W. Wang, B. Zhang, and J. Hu, "Government affairs service platform for smart city," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 81, pp. 443–451, 2018.
- [71] R. Paciello *et al.*, "An innovative system for sharing, integration and visualization of heterogeneous 4D-information," *Environ. Model. Softw.*, vol. 77, pp. 50–62, 2016.
- [72] R. Padsala and V. Coors, "Conceptualizing , Managing and Developing : A Web Based 3D City Information Model for Urban Energy Demand Simulation," 2015.
- [73] C. Paper, J. Dambruch, C. Graphics, and C. Graphics, "Towards Interactive Geodata Analysis through a Combination of Domain-Specific Languages and 3D Geo Applications in a Web ...," no. January 2016, 2015.
- [74] B. Resch, A. Wichmann, and N. Goell, "Usability in 4D AR: Visualising multi-temporal real-time geo-data in augmented reality environments," *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 23–33, 2015.
- [75] G. Sagl, B. Resch, B. Hawelka, and E. Beinart, "From Social Sensor Data to Collective Human Behaviour Patterns – Analysing and Visualising Spatio-Temporal Dynamics in Urban Environments," *Jekel, T., Car, A., Strobl, J. Griesebner, G. GI\_Forum 2012*

*Geovizualisation, Soc. Learn.* © Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach. ISBN 978-3-87907-521-8., pp. 54–63, 2012.

- [76] I. Sánchez-Díaz, J. Holguín-Veras, and X. Wang, “An exploratory analysis of spatial effects on freight trip attraction,” *Transportation (Amst)*., vol. 43, no. 1, pp. 177–196, Jan. 2016.
- [77] R. Trubka, S. Glackin, O. Lade, and C. Pettit, “ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing A web-based 3D visualisation and assessment system for urban precinct scenario modelling,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 117, pp. 175–186, 2016.
- [78] M. Uden and A. Zipf, “Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences,” *Prog. New Trends 3D Geoinf. Sci.*, pp. 299–314, 2013.
- [79] J. Vaai, “4D Building Information Modelling With Augmented Reality on Mobile Devices to Support Construction Management: Applications and key performance criteria from a stakeholder perspective,” 2014.
- [80] J.-P. Virtanen, H. Hyypä, A. Kämäräinen, T. Hollström, M. Vastaranta, and J. Hyypä, “Intelligent Open Data 3D Maps in a Collaborative Virtual World,” *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, vol. 4, pp. 837–857, 2015.
- [81] K. Wanarat and T. Nuanwan, “Using 3D visualisation to improve public participation in sustainable planning process: Experiences through the creation of Koh Mudsum plan, Thailand,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 91, pp. 679–690, 2013.
- [82] B. Yang, “GIS based 3-D landscape visualization for promoting citizen’s awareness of coastal hazard scenarios in flood prone tourism towns,” *Appl. Geogr.*, vol. 76, pp. 85–97, 2016.
- [83] W. Chen, F. Guo, and F.-Y. Wang, “A Survey of Traffic Data Visualization,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 6, pp. 2970–2984, 2015.
- [84] A. Grignard, A. Drogoul, and U. M. I. Ummisco, “Agent-Based Visualization: A Real-Time Visualization Tool Applied Both to Data and Simulation Outputs,” pp. 670–675, 2017.
- [85] Y. Zheng, W. WU, Y. Chen, H. Qu, and L. Ni, “Visual Analytics in Urban Computing: An Overview,” *IEEE Trans. Big Data*, vol. 7790, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [86] E. Steiger, B. Resch, and A. Zipf, “Exploration of spatiotemporal and semantic clusters of Twitter data using unsupervised neural networks,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 8816, no. July, pp. 1–23, 2015.
- [87] G. Andrienko *et al.*, “Space, time and visual analytics,” *Int. J. Geogr. Sp. , time Vis.*



- Anal.*, vol. 24, no. 10, pp. 1577–1600, 2010.
- [88] G. Cao, S. Wang, M. Hwang, A. Padmanabhan, Z. Zhang, and K. Soltani, “A scalable framework for spatiotemporal analysis of location-based social media data,” *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 51, pp. 70–82, 2015.
- [89] W. Wang and K. Stewart, “Spatiotemporal and semantic information extraction from Web news reports about natural hazards,” *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 50, pp. 30–40, 2015.
- [90] W. Aigner, S. Miksch, H. Schumann, and C. Tominski, *Visualization of Time-Oriented Data*. London: Springer London, 2011.
- [91] M. A. Brovelli, C. E. Kilsedar, P. Hogan, G. Prestifilippo, and G. Zamboni, “NASA WorldWind : virtual globe for an open smart city,” 2016.
- [92] P. V. Thakuriah, K. Sila-nowicka, and J. G. Paule, “Sensing Spatiotemporal Patterns in Urban Areas : Analytics and Visualizations Using the Integrated Multimedia City Data Platform,” pp. 415–429, 2016.
- [93] A. Chua, E. Marcheggiani, L. Servillo, and A. Vande Moere, “Flowsampler: Visual analysis of Urban flows in geolocated social media data,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8852, pp. 5–17, 2015.
- [94] M. Tory and T. Möller, “Human factors in visualization research,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 10, no. 1, pp. 72–84, 2004.
- [95] S. Gao, “Spatio--Temporal Analytics for Exploring Human Mobility Patterns and Urban Dynamics in the Mobile Age,” *Spat. Cogn. Comput.*, vol. 15, no. 2, pp. 86–114, 2015.
- [96] “Potree Viewer.” [Online]. Available: <http://potree.entwine.io/data/nyc.html>. [Accessed: 26-Jul-2018].
- [97] vimeo, “Check-in data at Downtown Disney.”
- [98] MIT SenseLab, “LIVE Singapore!” [Online]. Available: <http://senseable.mit.edu/livesingapore/visualizations.html>. [Accessed: 26-Jul-2018].
- [99] Google, “World Population,” 2011. [Online]. Available: <https://experiments.withgoogle.com/webgl-globe>.
- [100] M. A. Brovelli, P. Hogan, G. Prestifilippo, and G. Zamboni, “Multidimensional virtual globe for geo big data visualization,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 41, no. September, pp. 563–566, 2016.

- [101] B. Resch, *Progress in Location-Based Services*, no. November. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [102] Habidatum, “Habidatum.” [Online]. Available: <https://habidatum.com/>. [Accessed: 26-Jul-2018].
- [103] R. E. Roth, R. G. Donohue, C. M. Sack, T. R. Wallace, and T. M. A. Buckingham, “A process for keeping pace with evolving web mapping technologies,” *Cartogr. Perspect.*, vol. 2014, no. 78, pp. 25–52, 2014.
- [104] J. H. Keysers, “Review of digital globes 2015,” *Aust. New Zeal. Coop. Res. Cent. Spat. Inf.*, no. March, 2015.
- [105] Khronos Group, “WebGL Overview - The Khronos Group Inc.” [Online]. Available: <https://www.khronos.org/webgl/>. [Accessed: 19-Jul-2018].
- [106] M. Brovelli, M. Minghini, and G. Zamboni, “Web-based Participatory GIS with data collection on the field – A prototype architecture,” *Free Open Source Softw. Geospatial Conf. Proc.*, vol. 13, no. 1, Feb. 2018.
- [107] B. Bach, P. Dragicevic, D. Archambault, C. Hurter, and S. Carpendale, “A Review of Temporal Data Visualizations Based on Space-Time Cube Operations,” *Eurographics Conf. Vis.*, pp. 23–41, 2014.
- [108] Y. He, F. Su, Y. Du, and R. Xiao, “Web-based spatiotemporal visualization of marine environment data,” *Chinese J. Oceanol. Limnol.*, vol. 28, no. 5, pp. 1086–1094, Sep. 2010.
- [109] N. Andrienko, G. Andrienko, and P. Gatalsky, “Exploratory spatio-temporal visualization: An analytical review,” *J. Vis. Lang. Comput.*, vol. 14, no. 6, pp. 503–541, 2003.
- [110] G. Andrienko, N. Andrienko, J. Dykes, S. I. Fabrikant, and M. Wachowicz, “Geovisualization of dynamics, movement and change: key issues and developing approaches in visualization research,” *Inf. Vis.*, vol. 7, no. 3–4, pp. 173–180, 2008.
- [111] M. Nagarajan, K. Gomadam, A. P. Sheth, and A. Ranabahu, “Spatio-Temporal-Thematic Analysis of Citizen Sensor Data : Challenges and Experiences,” pp. 539–553, 2009.
- [112] U. Demšar and K. Virrantaus, “Space--time density of trajectories: exploring spatio--temporal patterns in movement data,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 24, no. 10, pp. 1527–1542, 2010.
- [113] M. C. Watson, “Time maps: A tool for visualizing many discrete events across multiple timescales,” in *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Big Data, IEEE*

*Big Data 2015*, 2015.

- [114] C. Claramunt and K. Stewart, “Special Issue on Spatio-Temporal Theories and Models for Environmental, Urban and Social Sciences: Where Do We Stand?,” *Spat. Cogn. Comput.*, vol. 15, no. 2, pp. 61–67, 2015.
- [115] J. J. Thomas and K. A. Cook, “Illuminating the path: The research and development agenda for visual analytics,” *IEEE Comput. Soc.*, p. 184, 2005.
- [116] M. Perry, “Analyzing Theme , Space , and Time : An Ontology-based Approach,” pp. 147–154, 2006.
- [117] D. Keim, G. Andrienko, J. D. Fekete, C. Görg, J. Kohlhammer, and G. Melançon, “Visual analytics: Definition, process, and challenges,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 4950 LNCS, pp. 154–175, 2008.
- [118] W. Aigner, S. Miksch, W. Müller, H. Schumann, and C. Tominski, “Visual Methods for Analyzing Data,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 14, no. 1, pp. 47–60, 2008.
- [119] H. Yu, “A Space-Time GIS for Visualizing and Analyzing Clusters in Large Tracking Datasets,” pp. 93–109, 2009.
- [120] C. M. Schmidt and L. Xia, “Invisible Cities: Representing Social Networks in an Urban Context,” *Parsons J. Inf. Mapp.*, vol. 3, no. 1, 2010.
- [121] C. Goranson, X. Huang, W. Bevington, and J. Kang, “Data Visualization for Big Data,” *Parsons J. Inf. Mapp.*, 2014.
- [122] U. Demšar *et al.*, “Analysis and visualisation of movement: an interdisciplinary review,” *Mov. Ecol.*, vol. 3, no. 1, p. 5, 2015.
- [123] A. Moran, V. Gadepally, M. Hubbell, and J. Kepner, “Improving Big Data Visual Analytics with Interactive Virtual Reality,” *2015 IEEE High Perform. Extrem. Comput. Conf. (HPEC '15)*, pp. 0–5, 2015.
- [124] K.-S. Kim, I. Kojima, and H. Ogawa, “Discovery of local topics by using latent spatio-temporal relationships in geo-social media,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 30, no. 9, pp. 1899–1922, 2016.
- [125] M.-H. Tsou, “Research challenges and opportunities in mapping social media and Big Data,” *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 42, no. sup1, pp. 70–74, 2015.
- [126] “TAIPEI.” [Online]. Available: <https://3d.taipei/>. [Accessed: 26-Jul-2018].
- [127] S. Garlandini and S. I. Fabrikant, “Evaluating the Effectiveness and Efficiency of

Visual Variables for Geographic Information Visualization,” *Lncs*, vol. 5756, pp. 195–211, 2009.

- [128] T. Kolbe, “Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML,” *3D Geo-Information Sci.*, pp. 15–31, 2009.

# Annexe A

## Questionnaire pour tests utilisateurs

### DÉBUT QUESTIONNAIRE

#### 1. *Section informations personnelles*

**Q1.1** Quelle est votre niveau d'expérience personnelle avec des outils comme celui-ci? Veuillez répondre sur une échelle de 1 à 5 (1 = très peu d'expérience et 5 = beaucoup d'expérience).

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

#### 2. *Section concernant les pistes cyclables passées et actuelles*

**Q2.1** Combien de pistes cyclables (en pourcentage de rue, 100% signifie qu'il y a autant de pistes cyclables que de rues) sont présentement dans votre quartier?

- Moins de 15%
- Entre 15% et 20%
- Plus de 20%

**Q2.2** Combien de pistes cyclables la Ville de Montréal a-t-elle construites au cours des 3 dernières années?

- Moins de 10
- Entre 10 et 20
- Plus de 20

Et où ont-elles principalement été construites?

- Ville-Marie
- Le Sud-Ouest

Qu'est-ce que vous a aidé à répondre à la question ci-dessus? Veuillez choisir au moins une réponse.

- Les bâtiments 3D
- Le graphique
- Visualiser l'évolution des pistes cyclables construites
- Toutes ces réponses

- Autre (**Veillez préciser**)

**Q2.3** Au cours des années 2013, 2014 et 2016, environ 5000 répondants ont participé à une enquête sur la quantité de pistes cyclables offerte par la Ville de Montréal. La question était s'il jugeait suffisante la quantité de pistes cyclables construites pour une année. Voyez-vous une corrélation (un lien) entre le niveau de satisfaction des répondants et le nombre de pistes cyclables construites pour les années 2013, 2014 et 2016? Veuillez répondre par oui ou par non.

- Pour 2013
  - Oui ou non
- Pour 2014
  - Oui ou non
- Pour 2016
  - Oui ou non

Qu'est-ce que vous a aidé à répondre aux questions ci-dessus? Veuillez choisir au moins une réponse.

- Les bâtiments 3D
- Le graphique
- Visualiser l'évolution des pistes cyclables construites des dernières années
- Visualiser l'évolution du niveau de satisfaction citoyenne des dernières années
- Toutes ces réponses
- Autre (**Veillez préciser**)

**Q2.4** Comment évaluez-vous la représentation de l'évolution du niveau de satisfaction citoyenne en 3D?

- Confuse
- Claire
- Stimule la curiosité
- Augmente la compréhension du processus
- Autre (**Veillez préciser**)

### 3. *Section concernant les pistes cyclables futures*

**Q3.1** La Ville de Montréal souhaite construire de nouvelles pistes cyclables pour les années 2018, 2019 et 2020 dans les arrondissements Ville-Marie et Sud-Ouest. Veuillez choisir deux pistes cyclables pour 2018 en entrant leur numéro respectif (le numéro d'une piste cyclable s'affichera lorsque sélectionné sur la scène). Note : La construction des pistes cyclables pour les années 2019 et 2020 sera dépendante des choix réalisés en 2018, vous pouvez utiliser la ligne de temps pour visualiser l'impact d'un choix. Par exemple, seulement les pistes cyclables de 2019 ayant une connexion avec celles choisies en 2018 seront construites.

- Piste cyclable #1 :
- Piste cyclable #2 :

**Q3.2** Est-ce que visualiser l'impact de vos choix vous a permis de prendre une meilleure décision?

- Oui
- Non
- Peut-être
- Commentaire libre (**Veillez préciser**)

#### **4. Section concernant la construction de nouveaux bâtiments**

**Q4.1** La Ville de Montréal planifie construire de nouveaux bâtiments pour répondre à la demande croissante de la population. Voici une projection pour les dix prochaines années (2020, 2025 et 2030) pour 4 secteurs situés dans Ville-Marie et le Sud-Ouest. Vous pouvez utiliser la ligne de temps pour visualiser la construction de nouveaux bâtiments ainsi que la nouvelle densité de population suite à ces constructions.

Pour chaque secteur, comment évaluez-vous la projection proposée? Veuillez encercler les réponses suivantes si vous êtes en accord. Note : Vous pouvez appuyer sur le bouton « Zoom construction » pour naviguer à travers les secteurs.

##### **Secteur 1.**

- J'aime voir de nouveaux gratte-ciels se faire construire dans ce secteur
- Je n'aime pas voir de nouvelles constructions remplacer l'héritage de la ville
- Autre (**Veillez préciser**)

##### **Secteur 2.**

- J'aime voir de nouveaux gratte-ciels se faire construire dans ce secteur
- Je n'aime pas voir de nouvelles constructions remplacer l'héritage de la ville
- Autre (**Veillez préciser**)

##### **Secteur 3.**

- J'aime voir de nouveaux gratte-ciels se faire construire dans ce secteur
- Je n'aime pas voir de nouvelles constructions remplacer l'héritage de la ville
- Autre (**Veillez préciser**)

##### **Secteur 4.**

- J'aime voir de nouveaux gratte-ciels se faire construire dans ce secteur
- Je n'aime pas voir de nouvelles constructions remplacer l'héritage de la ville
- Autre (**Veillez préciser**)

De plus, veuillez sélectionner (en appuyant du CTRL + CLIQUE GAUCHE) les bâtiments dont vous jugez inappropriés. Pour soumettre la sélection, veuillez appuyer sur le bouton « Soumettre les bâtiments ».

**Q4.2** Trouvez-vous que cette visualisation des projections proposées est pertinente pour les citoyens?

- Oui
- Non
- Peut-être
- Autre (**Veillez préciser**)

**Q4.3** Comment évaluez-vous la représentation de l'évolution de nouveaux bâtiments en 3D?

- Confuse
- Claire
- Stimule la curiosité
- Augmente la compréhension du processus
- Autre (**Veillez préciser**)

**Q4.4** Comment évaluez-vous la représentation de l'évolution de la densité de population en 3D?

- Confuse
- Claire
- Stimule la curiosité
- Augmente la compréhension du processus
- Autre (**Veillez préciser**)

## **5. (finale) Section concernant l'évaluation de l'expérience**

Afin de conclure l'expérience, nous vous demandons d'évaluer sur une échelle de 0 à 10 (0 = Ne sais pas, 1 = totalement en désaccord, 10 = totalement en accord) les réponses suivantes. Des commentaires / suggestions supplémentaires sont également appréciés pour améliorations futures.

- En générale, la plateforme m'a permis de mieux comprendre le contexte géographique des questions soumises m'aidant ainsi à donner une réponse plus informée. **Veillez spécifier.**
- En comparaison avec la dimension 2D, la dimension 3D m'a permis de mieux comprendre le contexte géographique de la question m'aidant ainsi à donner une réponse plus informée. **Veillez spécifier.**
- Les simulations dans l'espace et le temps m'ont permis de mieux comprendre l'évolution des informations concernées par les réponses (ex. satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables construites, pistes cyclables proposées). **Veillez spécifier.**
- Les simulations dans l'espace et le temps sont pertinentes pour montrer des propositions futures et l'impact des choix réalisés. **Veillez spécifier.**



- Les visualisations 3D + temps (ex. satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables) étaient claires et intuitives. **Veillez spécifier.**
- En général, le graphique m'a aidé à mieux comprendre la simulation espace-temps des éléments géographiques (ex. satisfaction citoyenne, bâtiments, pistes cyclables). **Veillez spécifier.**
- En général, les informations spatiales fournies pour répondre aux questions étaient pertinentes et m'ont permis de bien comprendre la question. **Veillez spécifier.**
- Si la ville disposait d'un tel outil pour obtenir l'avis de ses citoyens, auriez-vous envie de participer davantage? **Veillez spécifier.**

Espace libre pour commentaires et suggestions.

**FIN DU QUESTIONNAIRE**