Université de Toulouse

MASTER 2 GEOMATIQUE

« **S**c**I**ences **G**éomatiques en environne**M**ent et **A**ménagement »
(**SIGMA**)

http://sigma.univ-toulouse.fr

RAPPORT DE STAGE

ANALYSE DU POTENTIEL DE COMPLEMENTARITE ENTRE SIG ET BIM POUR LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION D'UN BATIMENT

SPECKLIN Nicolas

GROUPE OTE INGÉNIERIE

Maître de stage : MOISY Stéphane

Enseignant-référent : SHEEREN David

Septembre 2020

Remerciements

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont accompagné tout au long de ce travail. Je remercie tout d'abord David Sheeren qui a bien voulu superviser ce stage en tant que tuteur pédagogique.

Je remercie ensuite Stéphane Moisy qui, en tant que maître de stage, a suivi avec grand intérêt l'évolution de mon travail et a été d'une aide précieuse pour surmonter les difficultés techniques rencontrées. Il a aussi largement contribué à l'identité visuelle du projet par ses avis judicieux sur le rendu graphique. J'apprécie aussi tout particulièrement le fait qu'il ait toujours pris le temps de partager avec moi ses vastes connaissances d'urbanisme, de SIG, et de DAO.

Je voudrais aussi remercier mes collègues cartographes Aurélien Gazo et Murielle Thuilier pour leur accueil chaleureux et leurs conseils avisés tout au long des missions qui m'ont été confiées.

J'adresse également mes remerciements à Léa Dentz, Alexandre Studer, ainsi qu'aux directeurs techniques d'OTE, sans le concours desquels ce projet n'aurait pas été possible.

Enfin, je voudrais remercier les collaborateurs en urbanisme et en environnement pour l'ambiance sympathique au sein du département.

Résumé

La complémentarité entre BIM et SIG se conçoit naturellement comme la convergence entre le contenu, la maquette numérique du bâtiment, et la carte, son contenant. Cette pratique encore récente s'est rapidement développée ces dernières années à mesure que l'intégration logicielle devenait plus facile. Une étape a été franchie en 2017 avec le partenariat *Autodesk - ESRI*, lequel rend interopérable les formats natifs de leurs solutions BIM et SIG (*Revit* et *ArcGIS*). Afin d'anticiper cette convergence, le Groupe OTE a choisi d'explorer la complémentarité entre son service de cartographie et sa pratique de la maquette numérique, avec comme support le projet du Parc des Expositions de Strasbourg (PEX). Le but est d'évaluer les possibilités techniques et graphiques des logiciels en place, d'élaborer des chaînes de traitement efficaces, et de faire émerger des plus-values métier aussi bien pour les cartographes que pour l'équipe de maîtrise d'œuvre.

La maquette BIM du PEX est importée dans *ArcGIS Pro* 2.5 pour y être filtrée puis convertie en paquet de couche de bâtiment. Ce modèle numérique du bâtiment est ensuite mis en ligne sur *ArcGIS Online* pour être affiché dans des scènes 3D locales et complété par des données concernant les enjeux réglementaires, environnementaux, les réseaux et les équipements. Enfin, une application de cartographie web intégrée dans une *StoryMap* a été développée avec l'*API ArcGIS for JavaScript* afin d'enrichir les scènes d'outils d'analyse et de les diffuser auprès des collaborateurs d'OTE.

Ces derniers disposent désormais d'un outil leur donnant une lisibilité sur les enjeux autour du PEX ainsi que d'un inventaire des couches à considérer, en plus d'un support visuel de communication multi-métiers.

Abstract

The complementarity between BIM and GIS can be comprehended as the process of bringing the content, namely the Building Information Model, into its container: the map. Although the use of BIM in GIS is quite recent, it has been fostered in the last years as the cross-software integration capabilities grew. A milestone was reached in 2017 with the *Autodesk - ESRI* partnership making the native *Revit* and *ArcGIS* formats interoperable. In order to be among the frontrunner, OTE Group has chosen the building project of the Strasbourg Exhibition Hall (PEX) to probe the complementarity between its GIS department and its practice of BIM. The objectives are : assessing the technical and visual capabilities of the available softwares, developing efficient workflows, and unearthing professional added value for the GIS practitioners and the civil engineers.

The PEX building model is imported in *ArcGIS Pro 2.5* for processing and exported into a building scene layer package. This layer package is then uploaded to *ArcGIS Online* to be displayed in 3D local scenes, which are provided with feature layers such as: reglementary and environmental stakes, networks, and urban facilities. Lastly, a web mapping application has been developed with the *ArcGIS API for JavaScript* in order to complement the scenes with analysis tools and share them with the colleagues. The application is also embedded in a *StoryMap.*

The coworkers at OTE now have a tool at their disposal to explore the stakes surrounding the PEX, and which offers an inventory of all GIS layers to consider in their tasks. It is also a visual support for communicating with stakeholders and partners.

Table des matières

REMERCIEMENTS ..... **I**

RESUME ..... **II**

ABSTRACT ..... **II**

LISTE DES FIGURES **3**

LISTE DES TABLES **3**

LISTE DES ACRONYMES **4**

1. INTRODUCTION **5**

2. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE **6**

2.1. STRUCTURE D'ACCUEIL : LE GROUPE OTE INGENIERIE 6
2.2. DEFINITIONS GENERALES DU CONCEPT DE BIM 6
2.3. NORMALISATION DU BIM DANS LA PRATIQUE DES BTP 3
2.4. FONCTIONNEMENT ET PRATIQUE DU BIM 4
2.4.1. Niveau d'intégration *4*
2.4.2. Le format IFC *5*
2.5. ENJEUX ET ATOUTS DE L'INTEGRATION SIG-BIM 6
2.5.1. Structuration et interopérabilité des données *7*
a) Les modèles de données 7
b) Pistes d'intégration des données SIG et BIM 7
2.5.2. Catalogage de la donnée *9*
2.5.3. Représentation multi-échelles *10*

3. OBJECTIFS ET EXIGENCES DU STAGE **12**

4. PRESENTATION DU PROJET - LE PARC DES EXPOSITIONS DE STRASBOURG (PEX) **13**

4.1. LOCALISATION ET DESSERTES 14
4.2. EXIGENCES OPERATIONNELLES 15
4.3. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL 17

5. TRAVAUX PREPARATOIRES POUR L'INTEGRATION BIM-SIG **19**

5.1. IDENTIFICATION DES ENJEUX 19
5.2. CONCEPT DE LA MAQUETTE NUMERIQUE INTEGREE 20

6. DONNEES ET TRAITEMENTS **22**

6.1. CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES PROJET 22
6.1.1. Données du PLUi de l'Eurométropole Strasbourg *22*
6.1.2. Servitudes d'utilité publique *23*
6.1.3. Risques et sous-sol *24*
6.1.4. Voirie et transport *26*
6.1.5. Réseaux existants *26*
6.1.6. Réseaux projetés *28*
6.1.7. Données sur l'environnement *29*
6.1.8. Maquette numérique 3D de l'environnement *30*
6.1.9. Sécurité incendie *31*
6.1.10. Modèle Numérique de Terrain *31*
6.2. MISE EN LIGNE DES DONNEES SIG 32

6.3. PREPARATION DE LA MAQUETTE BIM 33
6.3.1. Géoréférencement et import 35
6.3.2. Tri des états de calques 36
6.3.3. Création de la couche bâtiment 38
6.4. INTEGRATION EN LIGNE ET CYCLE DE LA DONNEE 38
6.5. DESCRIPTION DES SCENES ET RENDU VISUEL 39
6.5.1. Scène 1 (esquisse - faisabilité) 39
6.5.2. Scène 2 (conception technique - travaux) 40
6.5.3. Scène 3 (conception technique - réseaux) 41
6.5.4. Scène 4 (exploitation - gestion) 41

7. DEVELOPPEMENT DE L'APPLICATION WEB 43

7.1. STRUCTURE DU PROGRAMME 44
7.1.1. Le code JavaScript 44
7.1.2. Liste des widgets 44
7.2. HEBERGEMENT DU PROGRAMME 46
7.3. LIVRABLE 46

8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 48

9. BIBLIOGRAPHIE 50

10. ANNEXE 52

10.1. DIAGRAMME DE GANTT 52
10.2. CONCEPT GENERAL D'INTEGRATION BIM – SIG 53
10.3. CARTE DE SITUATION LOCALE 54

Liste des figures

Figure 1 : frise chronologique du BIM (Andersen, 2020 ; RIB, 2017) 3
Figure 2 : multiplication des maquettes métiers avant et après le passage au numérique (Oehrli et Niggeler, 2017) 4
Figure 3 : diagramme UML de la géométrie du CityGML (OGC, 2012) 8
Figure 4 : exemple de niveau de détail de la donnée CityGML (OGC, 2012) 9
Figure 5 : vue depuis le parvis (Kengo Kuma & Associates, image by Lunance) 13
Figure 6 : plan de masse du PEX (OTE Ingénierie) 14
Figure 7 : plan des accès au site du PEX (OTE Ingénierie) 14
Figure 8 et Figure 9 : flux exposants (gauche) et flux visiteurs (droite) (OTE Ingénierie) 16
Figure 10 : aires de stationnement du PEX (OTE Ingénierie) 17
Figure 11 : synthèse de l'intégration de la maquette du PEX dans un SIG 21
Figure 12 : zone d'étude et site de construction (OTE Ingénierie) 22
Figure 13 : profondeurs d'enfouissement des réseaux (Totalgaz) 28
Figure 14 : maquette architecturale 33
Figure 15 : maquette structurelle 34
Figure 16 : chaîne des traitements de la maquette BIM 35
Figure 17 : maquette MEP (electrical) et enveloppe BIM en transparence 36
Figure 18 : effets des ornements à longue distance 38
Figure 19 : cycle de la donnée 39
Figure 20 : rendu visuel de la scène 1 40
Figure 21 : rendu visuel de la scène 2 40
Figure 22 : rendu visuel de la scène 3 41
Figure 23 : rendu visuel de la scène 4 42
Figure 24 : aperçu de la StoryMap 46

Liste des tables

Tableau 1 : différences entre SIG et BIM (complété à partir de Oehrli et Niggeler, 2017) 6
Tableau 2 : synthèse des enjeux environnementaux du PEX (EuroMétropole Strasbourg, 2019) 17
Tableau 3 : information géographique d'intérêt pour la maquette 19
Tableau 4 : classes d'entités du PLUi de Strasbourg 22
Tableau 5 : classes d'entités des SUP 23
Tableau 6 : classes d'entités des risques et des sous-sols 24
Tableau 7 : classes d'entités des transports et de la voirie 26
Tableau 8 : classes d'entités des réseaux existants 26
Tableau 9 : classes d'entités des réseaux projetés 28
Tableau 10 : classes d'entités de l'environnement 29
Tableau 11 : classes d'entités de la maquette 3D de l'environnement 30
Tableau 12 : classes d'entités de la sécurité incendie 31
Tableau 13 : tri des couches dans les jeux de données maquette 37

Tableau 14 : comparaison des widgets disponibles par produit ESRI.....43
Tableau 15 : liste des widgets utilisés.....44

Liste des acronymes

ADE	*Application Domain Extension*	**MH**	Monument Historique
AGOL	ArcGIS Online	**MINnD**	Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables
AIM	*Asset Information Model*	**MOA**	Maîtrise d'ouvrage
BD	Base de données	**NGF**	Nivellement général de la France
BIM	*Building Information Model/Modeling*	**NOx**	Oxydes d'azote
BTP	Bâtiment et travaux publics	**OBJ**	extension de fichier d'objets 3D
CAD	*Computer-aided design* (voir DAO)	**OGC**	*Open Geospatial Consortium*
CIM	*City Information Model*	**OTE**	Omnium Technique Européen
CNIG	Conseil National de l'Information Géographique	**PDF**	*Portable Document Format*
CRS	*Coordinate Reference System* (voir SCR)	**PEX**	Parc des Expositions
CSS	*Cascading Style Sheets*	**PLIM**	*Project Life Cycle Information Model*
CSW	*Catalogue Service for the Web*	**PLU**	Plan local d'urbanisme
CTS	Compagnie des transports strasbourgeois	**PM10**	*Particulate Matter* (<10µm)
CVC	Chauffage, ventilation et climatisation	**PMC**	Palais de la Musique et des Congrès
DAO	Dessin assisté par ordinateur	**PPR**	Plan de prévention des risques
DDT	Direction départementale des territoires	**RDC**	Rez-de-chaussée
DICT	Déclaration d'intention de commencement de travaux	**RGF**	Réseau géodésique français
DWG	extension de fichier AutoCAD	**RVT**	extension de fichier Revit
EAS	Espace d'attente sécurisé	**SIG**	Système d'Information Géographique
EMS	EuroMétropole Strasbourg	**SCR**	Système de Coordonnées de Référence
EPSG	*European Petroleum Survey Group*	**SHP**	extension de fichier *Shapefile*
ESRI	*Environmental Systems Research Institute*	**SLPK**	*Scene Layer Package*
FGDB	*File Geodatabase*	**SP**	Sapeur-Pompier
GML	*Geography Markup Language*	**SSI**	Système de sécurité incendie
GUI	*Graphical User Interface*	**SUP**	Servitude d'utilité publique
HTML	*Hypertext Markup Language*	**TCE**	Tout corps d'état
IDE	*Integrated Development Environment*	**UML**	*Unified Modeling Language*
IdO	Internet des Objets	**VCM**	*Vertical Construction Model*
IFC	*Industry Foundation Classes*	**VRD**	Voirie et réseaux divers
IoT	*Internet of Things* (voir IdO)	**WGS**	*World Geodetic System*
ISO	*International Organization for Standardization*	**WKB**	*Well-known Binary*
JS	*JavaScript*	**WKT**	*Well-known Text*
LoD	*Level of Detail*	**WLD3**	extension de fichier de géoréférencement
MEP	*Mechanical, Electrical, Piping*	**XML**	*Extensible Markup Language*

1. Introduction

Le groupe OTE Ingénierie a commencé dès 2011 à développer ses compétences en maquette numérique BIM avant de les regrouper au sein de sa marque *BiMagine* en 2014. A la fois outil technique et standard de travail, tous les projets menés par OTE dans le domaine du bâtiment, depuis la conception jusqu'à l'exploitation, sont aujourd'hui effectués en BIM. La maquette numérique est alimentée par les différents métiers du groupe (structure, acoustique, génie électrique, génie énergétique, etc.). Un BIM Manager ainsi que des coordinateurs BIM spécialisés assurent la cohérence des contributions individuelles. Une synthèse visuelle TCE (Tous Corps d'Etat) peut être générée à partir de la maquette numérique (Groupe OTE Ingénierie, 2020).

Le groupe possède également 20 années d'expertise en cartographie et SIG, appliquée principalement aux études environnementales et à l'urbanisme. Avec le développement de la cartographie 3D pour représenter les espaces urbains, le rapprochement entre BIM et SIG se conçoit naturellement comme un rapprochement entre « contenu » et « contexte » (ESRI France, 2019). La maquette numérique va compléter la cartographie par l'ajout d'un modèle d'objet physique, tandis que l'objet modélisé va gagner une lisibilité sur l'environnement immédiat dans lequel il s'insère. La maxime « le SIG informe le BIM, le BIM alimente le SIG » (arcOrama, 2019) résume bien ce rapprochement.

Si ce rapprochement se conçoit bien sur le papier, nous verrons que sa pratique est encore très nouvelle. Le groupe OTE a donc décidé de se placer parmi les précurseurs et de développer un nouveau portefeuille de compétence autour d'une cartographie 3D intégrant les maquettes numériques BIM.

2. Contexte et problématique

2.1. Structure d'accueil : le Groupe OTE Ingénierie

Le Groupe OTE est créé en 1962 par la fusion de trois cabinets d'ingénieurs conseil spécialisés en matière de structures, de fluides et d'économie de la construction. Ils sont rejoint en 1970 par un quatrième bureau d'étude spécialisé dans la thermique pour former la société OTE Ingénierie. Siégeant initialement à Strasbourg puis à Illkirch-Graffenstaden, la société est aujourd'hui présente à Mulhouse, Colmar, Paris, Metz, Nantes, Lyon, Bordeaux et Toulouse pour un effectif total de 220 salariés en 2019.

Les activités au cœur du groupe OTE sont les missions de maîtrise d'œuvre Tous Corps d'Etat et d'assistance à la maîtrise d'ouvrage. Elles sont réparties en huit départements :

- Direction de projet
- Direction de travaux
- Direction technique
- Economie de la construction
- Génie électrique
- Génie énergétique et climatique
- Structure
- Voirie et réseaux divers

Trois départements ainsi que trois marques viennent étendre les compétences de la société :

- l'urbanisme, auquel le service de cartographie est rattaché
- l'environnement (diagnostic de pollution des sols, études d'impact, etc.) dont dépend également la cartographie
- la prévention incendie et coordination SSI
- la marque *Note* pour l'ingénierie acoustique
- la marque *BiMagine* pour le BIM management
- la marque *EXpur* pour la déconstruction et le désamiantage

Le groupe possède également deux filiales : *Otélio* pour l'ingénierie du développement durable et *iteco* pour les activités de contractant général (constructeur clé en main). OTE Ingénierie offre donc à ses clients un portefeuille complet de compétences dans la construction, l'aménagement du territoire, et le développement durable.

2.2. Définitions générales du concept de BIM

L'acronyme BIM peut aussi bien signifier « Building Information Model » que « Building Information Modelling ».

L'association buildingSMART définit le *Building Information Model* (maquette numérique) comme une « représentation 3D des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment. Mais outre les 3 dimensions, elle intègre aussi la dimension temps (4D), les données financières (5D), environnementales (6D), patrimoniales (7D)… C'est donc avant tout une base de données techniques, constituée d'objets définis par leurs caractéristiques et leurs relations entre eux. Le tout forme un ensemble structuré d'informations sur un ouvrage » (buildingSMART France, 2019).

ESRI France donne la définition suivante du *Building Information Modelling* : « processus de création, de collecte et d'utilisation des données d'un modèle de données de projet. Méthode de travail basée sur la collaboration autour d'une maquette numérique. Dans un processus BIM, chaque acteur de la construction crée, renseigne et utilise cette maquette, et en tire les informations dont il a besoin pour son métier. En retour, il alimente la base de données de nouvelles informations pour aboutir au final à un objet virtuel renseigné, représentation nominale de la construction, de ses caractéristiques géométriques et de ses propriétés de comportement » (ESRI France, 2019).

D'autres définitions propres au domaine du génie civil existent, comme « *parametric, object oriented, attribute driven, digital representation of reality* » (Matejka et Tomek, 2017). En réalité, le BIM est un concept dont la compréhension varie énormément parmi les acteurs qui le pratique. Il peut-être néanmoins structuré en trois catégories (Matejka et Tomek, 2017) :

- Le BIM en tant que **produit** : correspond à la définition de la **maquette numérique** comme outil de conception et de visualisation. Cependant, l'acronyme BIM peut parfois là aussi prêter à confusion puisqu'il est un terme générique pour des maquettes très différentes selon les corps de métiers (génie électrique, génie civil, etc.) et selon les phases du projet. Dans le monde du génie civil anglo-saxon, il englobe par exemple : *Asset Information Model* (AIM, pour la maintenance et la gestion), *Project Life Cycle Information Model* (PLIM, pour modéliser le cycle de vie de la construction), ou *Vertical Construction Model* (VCM, pour la construction, acronyme aujourd'hui désuet).
- Le BIM en tant que **méthode** : est souvent la compréhension qu'en donne la littérature technique sur le sujet. Il s'agit de l'ensemble des **outils** (équipements, logiciels, etc.) et **processus** (échanges, interopérabilité, etc.) en vigueur au sein d'une entreprise pour construire la maquette numérique.
- Le BIM en tant que **méthodologie** : il s'agit de la méthodologie de travail **collaborative et en partage d'information** qui va façonner à la fois le projet, depuis l'appel d'offre jusqu'au rendu (MOA, cahier des charges « BIM ») mais aussi le cycle de vie de la construction elle-même, depuis sa conception jusqu'à sa démolition.

Les grandes différences de compréhension de ce qu'est le BIM sont dues au fait que la généralisation de sa pratique est récente (depuis 2006) et que le travail d'élaboration de normes et standards est lui aussi naissant. Dans le BTP, chaque acteur maîtrise son rôle sans forcément connaître l'ensemble du projet, de sorte que leur définition du BIM est souvent limitée au stricte usage qu'ils en font (Matejka et Tomek, 2017).

Au sein du Groupe OTE, le BIM correspond à la méthodologie de travail collaborative servant à alimenter la maquette numérique commune du projet, dans le double but de faciliter les échanges d'informations et d'analyses entre les corps de métiers et les phases du projet, et de fournir un rendu visuel synthétique du bâtiment. Nous faisons donc une distinction entre le BIM-méthodologie et la maquette numérique BIM autour de laquelle il est construit.

Dans le présent rapport, on privilégiera l'emploi de « maquette numérique » pour désigner le « BIM-produit ».

2.3. Normalisation du BIM dans la pratique des BTP

Le BIM est le descendant des logiciels de dessin développés depuis les années 80. La frise ci-dessous résume les grandes étapes de son évolution.

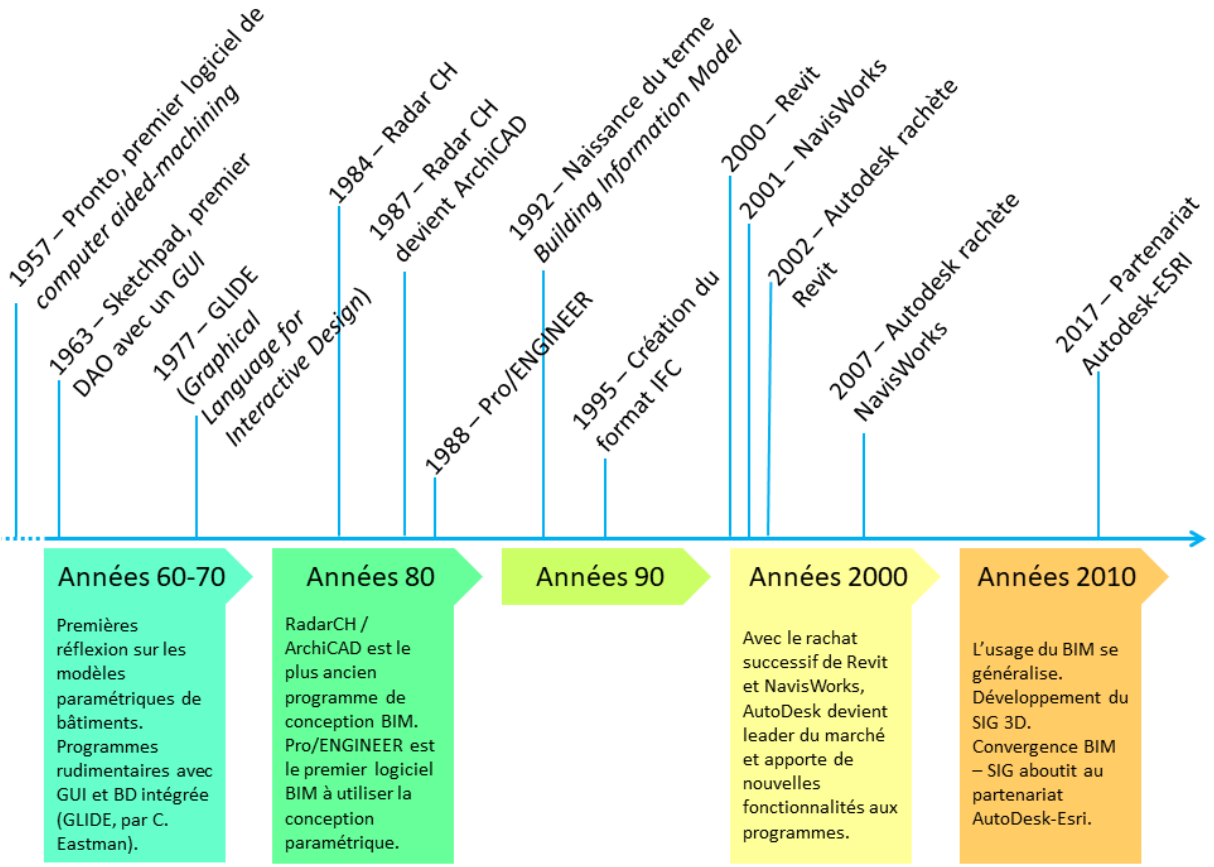

Figure 1 : frise chronologique du BIM (Andersen, 2020 ; RIB, 2017)

Le travail de normalisation des pratiques et des connaissances autour du BIM se met en place. En décembre 2018, l'ISO a publié la norme « Gestion de l'information par la modélisation des informations de la construction » (ISO 19650) décrivant l'organisation et la numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris la modélisation BIM (ESRI France, 2019). Les autres principales normes ISO qui concernent la pratique du BIM sont les normes ISO 19136 définissant le codage GML et ISO 16739 définissant le format d'échange IFC (voir section suivante).

En France, des organismes de recherche, des entreprises des BTP, des bureaux d'ingénieurs, des éditeurs de logiciel ainsi que des entreprises publiques ont fondé le projet national de recherche MINnD (Modélisation des Informations Interopérable pour les Infrasctrucutres Durables). Mis en œuvre entre 2014 et 2018, le MINnD a pour objet d'accompagner les acteurs de la construction en France dans leur transition vers le BIM pour les infrastuctures. Il faut savoir que si le BIM a connu un essor en France depuis 2006 (BIM & BTP, 2020), il est utilisé principalement pour la construction de bâtiment. Pour normaliser son usage aux infrastructures, le MINnD a donc publié un guide de mise en place du BIM et un guide d'application du BIM aux infrastructures (MINnD, 2019). Le MINnD apporte bien une contribution au BIM en tant que méthodologie de travail : « le déploiement du BIM répond à des objectifs aussi bien techniques qu'économiques. Il concerne l'ensemble des organisations et des métiers, y compris dans leurs relations contractuelles » (MINnD, 2019).

Un second programme d'action a été lancé par le MINnD pour l'horizon 2019-2021, structuré autour de 6 thèmes de réflexion :

- la structuration des données
- la qualification de la donnée
- la continuité numérique
- la convergence BIM-SIG
- la gestion du patrimoine et des actifs
- la collaboration

La question de l'intégration BIM-SIG est plus que jamais d'actualité. Nous verrons dans la section 2.5.1 que les questions de structuration des données, de continuité numérique et de collaboration (c-à-d : un stockage centralisé et des accès multi-utilisateurs) sont des enjeux cruciaux de cette intégration du fait que des solutions sont déjà en place dans le monde des SIG.

Autre témoignage de l'importance du BIM pour les SIG : le Conseil National de l'Information Géographique (CNIG) a mis en place un groupe de travail « Géostandard 3D au service des villes et territoires intelligents et durables ». Ses objectifs sont d'identifier et recenser les modèles numériques 3D existant ainsi que de définir les spécifications pour un référentiel géographique 3D national (CNIG, 2017).

2.4. Fonctionnement et pratique du BIM

2.4.1. Niveau d'intégration

Le BIM en tant que méthodologie peut être décrit en trois niveaux d'intégration (BIM & BTP, 2020). Le BIM de Niveau 1 correspond à une collection de maquettes numériques isolées: celle de l'architecte, celles des bureaux d'études. Les différents métiers vont s'échanger les plans et les fichiers au fil du processus de construction puis vont recréer leur maquette en fonction des informations puisées.

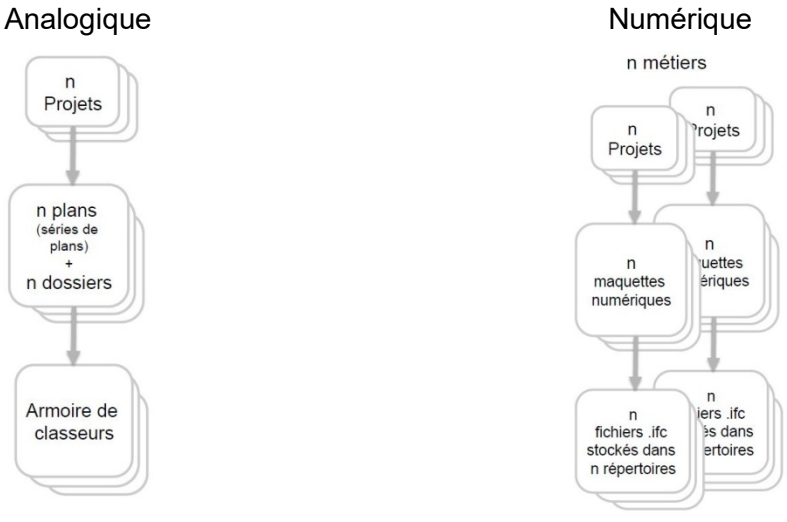

Figure 2 : multiplication des maquettes métiers avant et après le passage au numérique (Oehrli et Niggeler, 2017)

Le BIM de niveau 2 correspond à la maquette numérique collaborative où chaque corps de métier conçoit sa maquette, mais dispose d'un accès direct aux copies des autres maquette stockées sur un serveur d'archivage (sans droit d'écriture).

Le BIM de niveau 3 est la maquette numérique intégrée, c'est-à-dire centralisée sur un serveur commun. "Chaque intervenant travaille directement sur la maquette centrale, et non sur sa propre maquette. La collaboration est permanente, la progression globale de la conception est instantanée et un BIM Manager se charge d'effectuer la synthèse en temps réel des conflits" (BIM & BTP, 2020). Ce niveau d'intégration est encore peu opérationnel dans le monde du BTP et le Groupe OTE fait ainsi parti des précurseurs dans l'utilisation de cette technologie.

2.4.2. Le format IFC

Au BIM de niveau 1, l'échange des données et fichiers maquettes est assuré par un format orienté objet, libre et gratuit appelé IFC (*Industry Foundation Classes*). Créé en 1995 par l'association internationale buildingSMART qui regroupe des entreprises de la construction et des éditeurs de logiciel, l'IFC avait pour but d'assurer l'interopérabilité entre les logiciels de conception apparus aux débuts des années 80, et pour lesquels il n'existait pas encore de format standard. La création par l'ISO d'une norme IFC (ISO 16739) en 2013 a donné à ce format une reconnaissance internationale et tous les grands éditeurs incluent un support IFC dans leur logiciel (BIM & BTP, 2020). Le fichier IFC contient les propriétés de chaque objet (forme, matériau, propriétés physiques et mécaniques), sa sémantique ainsi que ses relations avec les autres objets (F3DF, 2020).

ESRI France apporte toutefois une nuance à cette interopérabilité garantie par l'IFC. En effet, lors d'un échange de fichier, l'émetteur va exporter sa maquette numérique en format IFC depuis son format natif logiciel, puis son interlocuteur va importer ce fichier dans son propre logiciel (qui peut être différent). Cette duplication des données (trois versions différentes du même objet) contredit le concept d'interopérabilité au sens des SIG par exemple (données sur serveur BD relationnelle multi-utilisateur). Ces duplications de fichiers IFC sont également source d'erreur: « certains logiciels de maquette génèrent des erreurs récurrentes dans la gestion des IFC, que ce soit à l'import ou à l'export. Très souvent ces erreurs sont flagrantes car elles concernent principalement les « attachements » entre objets. Il sera ainsi fréquent de voir un mur traverser un toit ou d'autres aberrations liées à cette perte de liaison » (BIM & BTP, 2020). De plus, les IFC étaient, jusqu'à la version 4, accusés de modifier le modèle paramétrique des données en ne convertissant pas toutes les propriétés des objets (Objectif BIM, 2019). Enfin, les extractions et imports sont souvent chronophages et nécessitent des scripts pour leur automatisation.

« En pratique, déplacer les données d'une phase à l'autre d'un projet, par exemple du cycle de vie d'un pont, revient à effectuer un transfert d'un logiciel à un autre. En effet, ces logiciels ne reconnaissent que leurs propres données, qui d'ailleurs perdent de leur richesse et de leur valeur dès qu'on les transfère. Par conséquent, lorsqu'un intervenant a besoin de données provenant d'une phase antérieure du processus, les chefs de projet, concepteurs et ingénieurs doivent souvent recréer ces informations manuellement, ajoutant bien des efforts inutiles » (Autodesk, 2020).

Le premier besoin auquel répond le BIM de niveau 3 est donc celui de la « continuité de l'information numérique ». Une maquette numérique pleinement intégrée résout les problèmes d'import/export et de différences de modèles de données propres à chaque logiciel.

2.5. Enjeux et atouts de l'intégration SIG-BIM

Le BIM et les SIG partagent un point commun fondamental: ce sont tous deux des outils de modélisation numérique d'objets physiques ainsi que des outils d'organisation de la donnée (Ould Said, 2017). Ils divergent cependant sur de nombreux détails techniques ainsi que dans leurs finalités :

Tableau 1 : différences entre SIG et BIM (complété à partir de Oehrli et Niggeler, 2017)

SIG	BIM
DIFFERENCES DE MOYENS	
Echelle globale/régionale à quartier	Echelle du bâtiment, voire du campus
Niveau de détail faible ou moyen	Données très précises et détaillées
Contexte, vue d'ensemble, relations topologiques entre plusieurs entités	Souvent une seule entité
Données géoréférencées	Localisation (sur la Terre) pas déterminante, référentiel peut être non-géographique
Interopérabilité vérifiée: structuration des données selon standards OGC	Interopérabilité partielle: structuration de la donnée propre à chaque logiciel, standard d'échange IFC
Horizon temporel le plus souvent figé (état à l'instant *t*)	Cycle de vie du bâtiment (nombreuses versions d'une maquette)
DIVERGENCES DE FINALITES	
Analyses cartographiques thématiques (peu de contributeurs différents par carte)	Coordination multi-métiers complexe
Abstraction de la réalité par la donnée (primitives géométriques: points, lignes, polygones)	Représentation la plus détaillée et fidèle possible de l'objet physique
Aide à la décision: représentation de l'existant, présentation de scénario	Outil de conception et de construction
3D utilisée principalement pour communiquer, comme option de visualisation (embellir le rendu)	3D pour modéliser et concevoir l'objet

Nous verrons que ces différences sont également des opportunités puisque l'objet de l'intégration BIM-SIG est justement de miser sur leur complémentarité, où les manques de l'un vont être palliés par les solutions de l'autre.

On notera par exemple que le SIG est de plus en plus porté en 3D (outil de scène sur ArcGIS ou de maquette paysagère sur QGIS, support d'objet 3D Collada, etc…). A mesure que le BIM offre du contenu pour la cartographie, la 3D devient pleinement un outil d'analyse SIG et non plus seulement un moyen de communication.

2.5.1. Structuration et interopérabilité des données

a) Les modèles de données

L'intégration de la donnée BIM et SIG est un double défi. D'une part, les modèles de données sont différents, d'autre part, BIM et SIG n'en sont pas au même niveau d'interopérabilité. Autrement dit, il est déjà difficile d'intégrer les BIM entre eux.

Les données cartographiques sont structurées en couches superposées. A chaque couche est associée une primitive géométrique (point, ligne, polygone) ainsi que des attributs non-géométriques. Les couches sont elles-mêmes des collections d'objets avec pour chacun une liste de coordonnées et des valeurs attributaires.

Les données d'une maquette numérique (BIM / DAO - Dessin Assisté par Ordinateur) sont structurées en familles d'objets paramétriques. Chaque objet porte un ensemble de données: graphiques et attributaires (aplicit, 2020). Ces familles d'objet paramétriques vont représenter les composant du bâtiment (volume du bâtiment, étage, pièce, équipements, cadre de porte, etc.) avec leur géométrie et leurs propriétés physiques et mécaniques.

Nous savons que dans les SIG, les données bénéficient de plusieurs solutions pour être interopérables. Le modèle de la donnée spatiale (objet décrit par sa géométrie, ses attributs et avec un référentiel géographique) est partagé par les formats fichiers les plus courants (fichiers de forme, GeoJSON, etc.). Ceux-ci sont supportés par l'écrasante majorité des applications et les procédures d'import et d'export sont généralement fiables. En outre, les objets géographiques peuvent, grâce à des standards indépendants définis par l'OGC (notamment le *Simple Feature Access*, WKB / WKT), être stockés dans diverses bases de données relationnelles multi-utilisateur (PostGIS, Oracle Spatial, MariaDB). Ces données peuvent être lues par la plupart des applications clients, être converties en format fichier pour être échangées, ou même être utilisées pour générer des flux de données distants (WMS, WFS, etc.). La Directive Européenne INSPIRE a largement contribué à l'application de ces standards OGC en contraignant les producteurs de données à travailler dans les normes existantes.

La « continuité numérique » de la donnée est donc bien établie dans le monde des SIG grâce à ces modèles de données universels. La meilleure illustration de ce cycle numérique est certainement la BD collaborative OpenStreetMap, qui peut être alimentée, requêtée et utilisée par des milliers d'utilisateurs simultanément.

Les modèles des données BIM sont encore très largement définis par leurs solutions logicielles. C'est avant tout le standard IFC qui offre une interopérabilité entre les différents systèmes, avec une fiabilité très relative, comme nous l'avons vu dans la section précédente. L'intégration avec les SIG peut donc certainement contribuer à la mise en place d'une interopérabilité BIM. Pour cela, deux pistes doivent être mentionnées ici : le format CityGML et l'accord ESRI - AutoDesk.

b) Pistes d'intégration des données SIG et BIM

Avec le BIM sont apparues il y a une dizaine d'année les premières maquettes urbaines 3D. La problématique de l'intégration des données SIG et DAO/BIM selon des normes garantissant leur interopérabilité s'est alors posée.

Le standard CityGML a été proposé par l'OGC en 2008 « pour le stockage, l'échange et la représentation des données liées aux modèles de villes » (Devys et Gesquière, 2012). Le

CityGML est défini comme un schéma d'application du language GML3 (*Geography Markup Language*), lui-même dérivé du XML. Ses caractéristiques principales sont les suivantes (Devys et Gesquière, 2012; Objectif BIM, 2019; OGC, 2012):

- Modélisation d'une large gamme d'objets urbains (bâtiment, réseau de transport, hydrographie, végétation, mobilier urbain) avec leurs propriétés géométriques, topologiques, sémantiques et d'apparence.
- Interopérabilité avec les autres formats de données vectorielles OGC, avec les services web WFS, et avec les principales applications SIG. En effet, le schéma UML de la géométrie du CityGML suit le standard OGC:

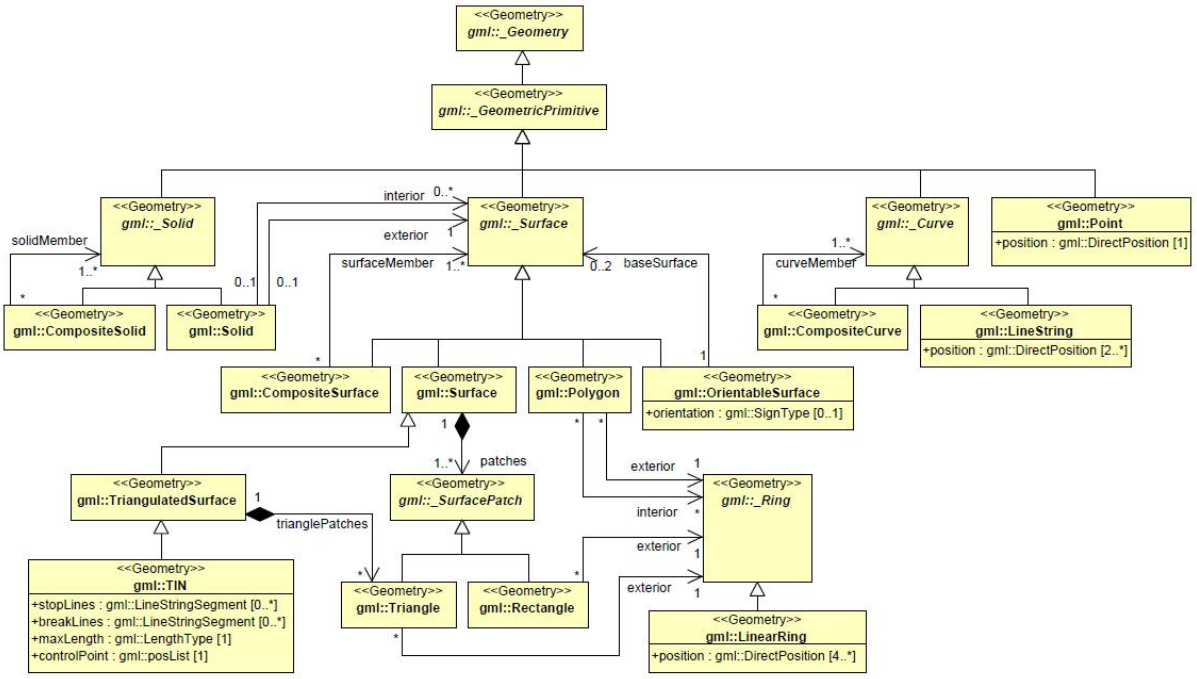

Figure 3 : diagramme UML de la géométrie du CityGML (OGC, 2012)

- La possibilité de créer des références entre la couche d'objet et des bases de données externes (cadastre par exemple) pour les garder à jour.
- Capacités d'extension « orientées métier » grâce aux ADE (*Application Domain Extension*), par exemple pour des modèles de bruits ou des représentations de réseaux ou d'ouvrages d'art (pont, tunnel).
- La gestion multi-échelle avec les LOD (*Level of Detail* - Niveau de Détail):
  - LOD 0: représentation en 2.5 D à partir d'un MNT. Les bâtiments sont représentés par des polygones « d'empreinte » ou de contour du toit.
  - LOD 1: les bâtiments sont de simples blocs extrudés avec toit plat.
  - LOD 2: on distingue des structures sur les toits et différents contours sur les surfaces.
  - LOD 3: modèle architectural avec des structures détaillées sur les murs et les toits (fenêtres, portes, ornements).
  - LOD 4: ajout de structures internes. Les bâtiments deviennent des composites d'autres éléments (étage, pièce, escaliers, équipement).

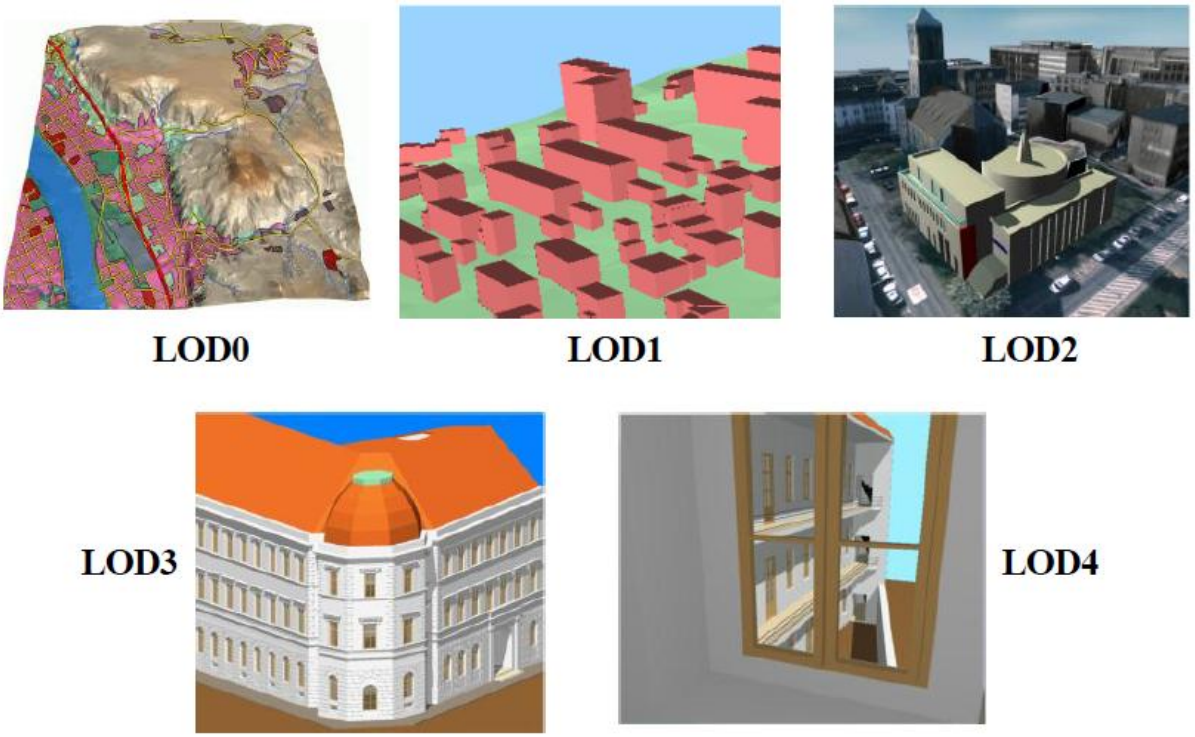

Figure 4 : exemple de niveau de détail de la donnée CityGML (OGC, 2012)

Une nouvelle étape a été franchie en octobre 2017 lorsque les éditeurs de logiciel ESRI et Autodesk ont signé un accord de partenariat autour de la convergence BIM - SIG. Ainsi, depuis sa version 2.2, *ArcGIS Pro* peut lire et charger le modèle BIM d'une application Autodesk *Revit* dans son projet cartographique. Un simple glisser/déposer suffit. Cet accord marque un véritable bond dans le sens de l'interopérabilité BIM - SIG puisqu'aucun export/import de fichier intermédiaire n'est nécessaire. *ArcGIS Pro* va charger en mémoire la maquette *Revit* dans son format natif, sans perte d'information. Les architectes peuvent également continuer à travailler sur *Revit* et les modifications seront automatiquement mises à jour dans la maquette lue sur *ArcGIS Pro* (ESRI France, 2019, 2020).

2.5.2. Catalogage de la donnée

Outre la donnée, le catalogage de celle-ci est un autre point qu'il reste à harmoniser entre BIM et SIG. La norme INSPIRE a été le principal catalyseur de l'archivage et du partage des métadonnées dans le monde des SIG. Du côté de l'*open source*, des standards OGC existent tels que le Catalogue Service (incluant le CSW), qui décrit les conventions de catalogage en format XML des ressources géoréférencées ainsi que les architectures d'interface à respecter dans le développement d'application de requêtage. ESRI possède un client CSW mais également son propre outil d'édition des métadonnées dans le logiciel *ArcCatalog*. L'écriture des métadonnées est une pratique de plus en plus répandue dans les SIG et toutes les solutions logicielles SIG offre des systèmes de catalogage des données.

Aucune norme n'existe autour des métadonnées BIM. D'une part, parce que la manière de cataloguer la donnée est propre à chaque logiciel et à chaque entreprise (souvent au moyen d'un simple tableur). D'autre part, les données BIM sont accompagnées de catalogues inexistants dans les SIG, à savoir les « bibliothèques d'objets génériques et fabricants » qui interagissent avec le logiciel dans la construction de la maquette numérique (ESRI France, 2019).

Le catalogage de la donnée reste donc à harmoniser entre le BIM et le SIG, et le BIM peut certainement bénéficier des pratiques en place dans le monde des SIG. Dans le cadre du partenariat Autodesk-ESRI par exemple, les modèles BIM importés dans ArcGIS bénéficient des mêmes fonctionnalités d'écriture de métadonnées que les formats natifs d'ESRI.

2.5.3. Représentation multi-échelles

Comme évoqué au début de cette section, les BIM et les SIG sont tous deux des modélisations du monde physique et des modèles de données (Ould Said, 2017). La convergence des normes techniques pour leur interopérabilité tend à se mettre en place. Il reste la question de la complémentarité des deux approches: en quoi les BIM et les SIG se complètent-ils ? Quels besoin poussent les architectes et les géomaticiens à les intégrer ?

Une vision BIM-SIG intégrée permet de jongler entre l'échelle du projet/bâtiment avec tous ses détails et l'échelle géographique (urbaine, régionale) qui va apporter le contexte physique, environnemental, et économique dans lequel l'objet se trouve. Deux chercheurs de l'Université Tsinghua de Pékin ont dressé un état des lieux des applications intégrées BIM et SIG, dont les avantages peuvent être synthétisés comme suit en fonction du cycle de vie du bâtiment (Ma et Ren, 2017):

- Phase de développement et de planification :
  - Aide à la décision quant au choix du site selon le design du bâtiment et inversement, conception de la structure en fonction des contraintes du site (géophysique et réglementaire).
  - Comparaison avec des données SIG diverses (plan urbain, trafic routier, climat) pour optimiser la conception acoustique, énergétique, et structurelle (connexion au trafic, réduction des dégâts infligés par des évènements climatiques).
  - Aide à la vérification de conformité et simplification des procédures d'autorisation, en intégrant le modèle BIM dans une maquette urbaine plus large visualisant les contraintes réglementaires d'urbanisme.
- Phase de construction :
  - Analyse géospatiale pour la logistique et la gestion des chaînes d'approvisionnement: mise en place des itinéraires, sites de dépôts, suivi des livraisons et des interruptions.
  - Suivi du calendrier et de l'avancement de la construction (mise à jour des données de la maquette commune en fonction du progrès).
  - Reconversion d'ancien bâtiment et cartographie des structures à rénover.
- Phase d'opération et de maintenance :
  - Calcul et visualisation de la consommation d'énergie.
  - Visualisation des connexions routières pour le calcul d'itinéraire combinant les réseaux internes et externes au complexe.
  - Sécurité: en combinant des modèles d'inondation, il est possible de calculer la hauteur d'eau sur le bâtiment et d'estimer les dégâts. Dans la lutte contre les incendies, en intégrant le réseau routier et la localisation des casernes de pompier à la maquette, il est possible d'optimiser le déploiement des sapeur-pompiers en fonction de scénarios de départ de feu.

- Gestion du patrimoine historique et protection des bâtiments classés : ajout de données SIG sémantiques aux BIM de monuments pour la planification de mesures de préservation.

- Phase de démolition :
  - Les données des réseaux routiers et des sites de traitements des déchets combinées aux informations sur les matériaux contenue dans le BIM permettent d'organiser le tri des déchets et de planifier les rotations des camions.

L'article rapporte également que la majorité des intégrations (53,7 % des applications revues) se font dans le sens d'une extraction d'une maquette BIM vers un Système d'Information Géographique. Les intégrations construites dans le sens inverse sont anecdotiques. Le deuxième cas le plus répandu est celui d'une extraction de maquette et de données SIG vers un système tiers (32,7 %).

Au-delà des avantages offerts aux architectes et aux métiers de l'ingénierie, l'intégration BIM - SIG est la base d'une nouvelle échelle d'analyse. Cette "méso-échelle" plus large que le seul bâtiment, mais limitée tout au plus à la ville, conserve les détails de la maquette BIM et permet ainsi de modéliser des raccordements et des interfaces cohérentes avec les infrastructures et les réseaux existants. La cartographie gagne aussi de cette intégration puisque la 3D devient plus qu'un simple outil de visualisation. Grâce à la maquette urbaine, on peut « envisager des simulations à l'échelle de la ville (trafic routier, accident industriel, événement naturel, etc) et comprendre leur impact sur les bâtiments » (Roua, 2018). Cette maquette urbaine combinant BIM et SIG porte le nom de CIM, pour *City Information Modeling*.

Les concepts de « Smart City » et « Internet des Objets » (IdO, *Internet of Things – IoT*), représentent une véritable révolution numérique pour l'urbanisme. Avec la multiplication des appareils, équipements, et infrastructures connectés, la donnée devient massive. Le CIM est un moyen prometteur d'en tirer parti, en canalisant les flux de données pour en extraire du sens. La maquette intégrée BIM - SIG est le premier pas vers une maquette urbaine intelligente.

3. Objectifs et exigences du stage

Le stage a pour objectif de créer une maquette numérique intégrée d'un bâtiment, en important une maquette BIM dans un Système d'Information Géographique. Afin de familiariser l'intégration BIM - SIG dans la pratique de la cartographie et de la maîtrise d'œuvre chez OTE Ingénierie, ce projet-pilote doit notamment apporter des éclaircissements sur les questionnements suivants:

- Quelles sont les données géospatiales disponibles et utiles pour concevoir une telle maquette ? Comment les structurer ?
- Quels sont les modes de représentation pertinents et quelles finalités servent-ils ? Quelles combinaisons d'état de calque et de couche SIG sont les plus appropriées? Quelles sont les interactions à configurer entre l'utilisateur et la maquette ?
- Quels sont les outils les plus efficaces et accessibles pour représenter la maquette et la diffuser sur le Web ?
- Quelle est la plus-value offerte aux différents métiers du groupe OTE ? Quelles sont les limites actuelles de la maquette et les développements à apporter ?

L'objectif final est d'explorer les possibilités et d'apporter des éléments de réflexion sur la complémentarité entre les produits BIM et SIG utilisés par OTE et sur les apports d'une telle intégration aux différents métiers du groupe.

La maquette numérique intégrée devra également répondre aux exigences suivantes :

- Elle devra suivre ou être compatible avec les méthodes de travail collaboratives BIM mises en place chez OTE.
- En terme de contenu, elle devra offrir *a minima* :
  - Une représentation 3D « compartimentée » représentant l'architecture du bâtiment avec les couches SIG des contraintes physiques, des risques, et des transports et services à proximité.
  - Une représentation « interface » ou le volume du bâtiment est mis en transparence. L'accent sera mis sur les raccordements aux réseaux et aux équipements.
- Elle devra utiliser un environnement de travail d'ESRI puisqu'il s'agit du standard de l'entreprise pour la cartographie et que les projets BIM sont réalisés avec le logiciel *Revit*, dont les maquettes peuvent être nativement intégrées aux applications *ArcGIS*.

4. Présentation du projet - le Parc des Expositions de Strasbourg (PEX)

Afin de réaliser une étude approfondie de la complémentarité BIM – SIG au sein du Groupe OTE, le cas d'étude doit être suffisamment complexe. Il doit idéalement s'inscrire dans une dynamique de développement urbain plus large (de quartier ou de ville par exemple), se trouver dans une zone riche en enjeux à cartographier et aussi être soumis à des contraintes opérationnelles qui le rendent dépendant des infrastructures en place (par exemple de transport). Un tel cas d'étude doit ainsi nous permettre d'évaluer une panoplie complète de données, de traitements et d'options de rendus visuels.

Un projet répondant à ces exigences est le Parc des Expositions de Strasbourg (PEX) qui sera construit dans le quartier du Wacken au Nord du Centre-ville, à côté de l'emplacement de l'ancien PEX. Cette construction s'inscrit dans un objectif plus ambitieux de ré-aménager le Wacken en Quartier d'Affaires d'envergure et de rayonnement international et de le doter de nouvelles infrastructures évènementielles, les existantes étant insuffisantes pour répondre à l'évolution de la demande. Une première étape vers cet objectif a été franchie en 2016 avec la rénovation et l'extension du Palais de la Musique et des Congrès (PMC) réalisée par OTE et qui a permis d'augmenter sa capacité d'accueil de 3000 m^2. Le nouveau PEX, le PMC ainsi que les Quartiers d'Affaires Internationales Archipel 1 et 2 s'inscrivent dans un même élan de développement de l'attractivité économique à proximité des Institutions Européennes (EuroMétropole Strasbourg, 2018). Un plan de situation locale est disponible dans les annexes.

Le nouveau PEX couvrira une superficie totale de 7,46 ha, dont 24775 m^2 de surface d'exposition, pour un coût de 86M€. Il possédera 5 halls d'exposition (quatre alignés et un en pavillon annexe) ainsi qu'un parking en silo. Il présente également la particularité d'être composé d'une structure d'acier avec des panneaux de bois ouverts laissant entrevoir une large façade vitrée. L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) a la maîtrise d'ouvrage. La réalisation a été confiée au cabinet d'architecte japonais Kengo Kuma & Associates au côté du groupe OTE Ingénierie et s'étend de 2018 à 2021.

Figure 5 : vue depuis le parvis (Kengo Kuma & Associates, image by Lunance)

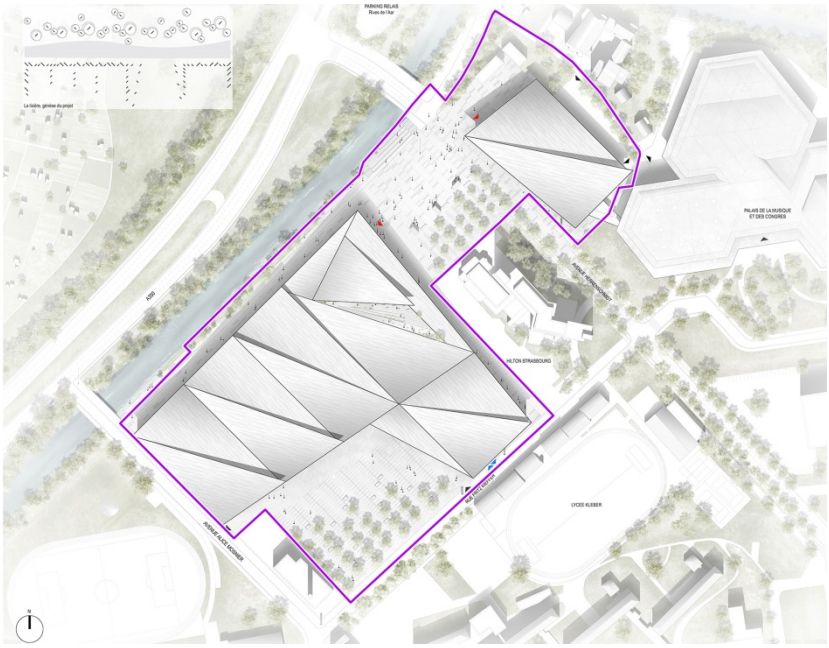

Figure 6 : plan de masse du PEX (OTE Ingénierie)

4.1. Localisation et dessertes

Le PEX sera situé entre :

- la rue Alice Mosnier au Sud-Ouest ;
- la rue Fritz Kieffer au Sud-Est ;
- l'avenue Herrenschmidt au Nord-Est, le séparant du PMC ;
- le canal de dérivation au Nord-Ouest ;

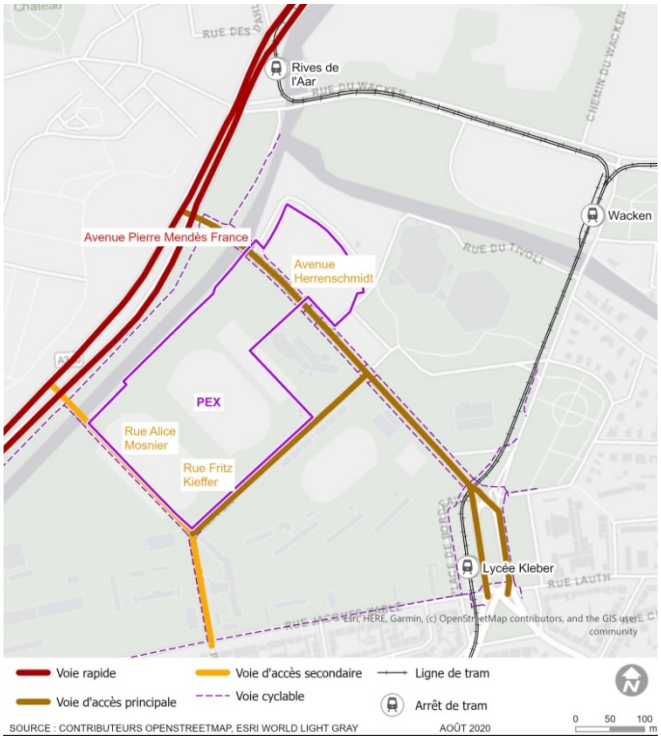

Figure 7 : plan des accès au site du PEX (OTE Ingénierie)

Le site est bien desservi par les transports en commun, notamment avec :

- l'arrêt du Tram B / Bus 50 et 60 « Rives de l'Aar » qui dispose également d'un parking relai pour voitures et vélos
- l'arrêt des Trams B et E / Bus 2 et H « Lycée Kléber »

Les deux arrêts sont situés à environ 400m du complexe.

Concernant l'accès routier, le site est à moins de 1km de l'autoroute A4 via l'avenue Mendès-France (anciennement A350), dont l'accès se fait par les rues Alice Mosnier et Herrenschmidt. Ces deux rues sont également les voies d'accès privilégiées pour la circulation venant du centre-ville. L'accès principal au site se fera via les Avenues Mendès-France et Herrenschmidt avec une contrainte particulière puisque l'accès à la rue Tivoli (adjacente à Herrenschmidt) devra être maintenue pour les riverains.

Le site du PEX présente donc des atouts majeurs (EuroMétropole Strasbourg, 2018):

- Avec le PMC, il forme une infrastructure évènementielle accueillant près de 800 000 visiteurs par an
- Proche du centre-ville, il est aussi très facilement accessible par l'autoroute ou les transports en commun
- Une capacité hôtelière quatre étoiles de plus de 500 chambres est directement sur place avec les hôtels Hilton et Mercure

4.2. Exigences opérationnelles

❖ **Capacité d'accueil**

Le PEX devra être en mesure d'accueillir des évènements de toutes sortes et de toutes tailles : foires, salons professionnels, congrès, conférences scientifique et sommets internationaux. En raison de contraintes de calendrier, plusieurs évènements peuvent avoir lieu simultanément. La modularité est donc au coeur de la conception de l'ouvrage et le bâtiment sera pourvu de grands volumes cloisonables, mutualisables et reconfigurables afin de garantir une gestion flexible des espaces d'exposition ainsi qu'une circulation fluide des visiteurs.

❖ **Accessibilité et gestion des flux**

Le système d'accès dans l'enceinte et aux abords du PEX devra être conçu de telle sorte que les différents usagers (cyclistes, automobilistes, piétons) ne se croisent pas et n'encombrent pas la circulation du quartier. Il faudra tout particulièrement séparer les flux des exposants des flux de visiteurs. Les premiers circulent principalement pendant les phases de montage/démontage, tandis que pour les visiteurs, les flux devront être séparé en sous-circuits :

- des véhicules accédant au parc de stationnement
- des piétons venant des arrêts « Rives de l'Aar » et « Lycée Kléber »
- des cyclistes venant de la piste cyclable de l'avenue Herrenschmidt

- des piétons et véhicules autour des arrêts navettes et dépose-minute
- des taxis avec des aires de dépose / reprise / attente

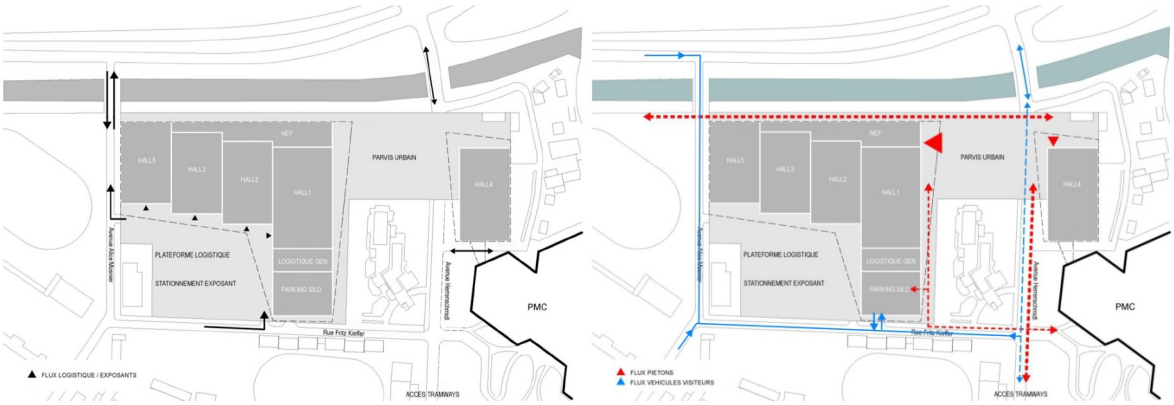

Figure 8 et Figure 9 : flux exposants (gauche) et flux visiteurs (droite) (OTE Ingénierie)

Le complexe possède deux points d'entrée : le parvis urbain sur l'avenue Herrenschmidt où convergent piétons et cyclistes et l'entrée des véhicules au niveau du parking silo sur la rue Fritz Kieffer. Les exposants auront un point de sortie véhicule direct sur la rue Alice Mosnier.

❖ Intégration urbaine

Au-delà d'un espace évènementiel, le PEX devra se concevoir comme un lieu de vie ouvert et perméable au public urbain. Il sera donc connecté aux aménagements paysagers existants et offrira des espaces extérieurs récréatifs en retrait des flux routiers, des axes piétons connectés à ceux du quartier, ainsi que des espaces d'animation destinés à des kiosques.

❖ Capacité de stationnement

Le PEX sera équipé de deux aires de stationnements :

- Une de 370 places pour les exposants en zone logistique.
- Une de 900 places pour les visiteurs (dont 54 pour véhicules électriques) dans le parking silo.

Des zones de stationnement vélos sont également prévues en zone logistique, sur le parvis, ainsi que devant le hall 4 pour une capacité totale de 291 places.

Figure 10 : aires de stationnement du PEX (OTE Ingénierie)

En cas d'évènements majeurs nécessitant plus de stationnements (Foire Européenne:1100 places supplémentaires), une réponse complémentaire sera apportée par la collectivité avec une mise en place de navettes vers d'autres aires de stationnement.

4.3. Etude d'impact environnemental

La visualisation des enjeux environnementaux sont typiquement des aspects pour lesquels une maquette intégrant des couches SIG peut se révéler intéressante. Nous avons donc résumé les enjeux considérés lors de l'évaluation environnementale du PEX dans le tableau suivant. L'évaluation relève de trois textes législatifs :

- le code de l'environnement (ICPE)
- le code minier
- la loi sur l'eau

Tableau 2 : synthèse des enjeux environnementaux du PEX (EuroMétropole Strasbourg, 2019)

ENJEU	CARACTERISTIQUE DU PEX
Eaux pluviales	- Rejet direct dans le canal de dérivation si eau de toiture - Séparation des hydrocarbures puis rejet dans le canal de dérivation si eau de voirie
Energie	- Production de chaud des halls : sous-station d'eau chaude raccordée au réseau urbain de chaleur du Wacken (centrale à biomasse) - Production de froid des halls : sous-station d'eau froide raccordée à un système de pompage dans la nappe phréatique - Eclairage par apport lumineux naturel pour la nef - Option de 600 m² de panneaux photovoltaïques sur les toits
Relief	L'altitude de l'emprise varie de 137,2m à 138m
Trafic routier	- Augmentation projetée lors d'un évènement majeur : de 3 PL/j à 25 PL/j - possibilité de BHNS desservant le PEX : étude en cours
Trames verte et bleue	Le canal de dérivation est un corridor écologique d'échelle régionale. Le PEX garde une marge de distance et maintient la ripisylve.

ENJEU	CARACTERISTIQUE DU PEX
Zone à dominante humide	Le boisement sur les bords du canal de dérivation. Les boisements seront préservés de la constructibilité.
Inondabilité du site	Le PEX est hors zone inondable par débordement de cours d'eau. Il est cependant soumis à l'aléa inondation par remontée de nappe. Le plancher des bâtiments du PEX doit s'implanter au minimum à 0,30 mètre au-dessus de la cote du terrain naturel qui est en moyenne à 137,30 mètres NGF. La dalle du RDC est envisagée à une altimétrie de 137,75 mètres NGF, soit 0,15 mètres au-dessus des restrictions imposées.
Pollution des sols	Zone de vigilance d'après le PLU. Prise en compte par des recouvrements isolants (dalle, surfaces macadamisées, collecte des eaux de pluie)
Pollution de l'air	Zone de vigilance PPA autour de l'avenue Mendès-France. Le PEX a été conçu de sorte à orienter les zones exposées à l'extérieur (entrée du public) vers l'opposé de la zone de vigilance.
Nuisance sonore	La source de nuisance sonore est l'avenue Mendès-France. Le PEX remplit les objectifs réglementaires pour réduire la nuisance sonore aussi bien de l'extérieur que vers le voisinage.
PLU de l'EMS	Le PEX est en zone UE1 et est compatible avec les objectifs d'urbanisme. En particulier, un recul de 12m minimum est maintenu par rapport aux rives et la ripisylve est conservée.

5. Travaux préparatoires pour l'intégration BIM-SIG

5.1. Identification des enjeux

Une recherche documentaire des études déjà réalisées par OTE pour le PEX nous donne un aperçu des enjeux pris en compte et pour lesquels nous devons intégrer de l'information géographique. Nous avons parcouru les documents suivants :

- l'évaluation environnementale décrite précédemment
- l'état initial de l'environnement : une série de cartes conçues par le service Environnement d'OTE offrant une visualisation quasi-exhaustive des enjeux et risques sur et à proximité du site
- les retours de Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) des différends exploitants de réseaux

Enfin la littérature sur le sujet (notamment Ma et Ren, 2017) vient compléter cet aperçu, ce qui nous permet de dresser une liste brute d'information géographique à préparer.

Tableau 3 : information géographique d'intérêt pour la maquette

Information géographique
Contraintes réglementaires et physiques
Contraintes d'urbanisme et de construction (PLU, servitudes)
Enjeux liés à l'eau (zones de captage, inondations, nappes)
Enjeux liés aux milieux naturels (sites classés, espèces protégées)
Enjeux liés aux risque (pollutions des sols, cavités souterraines)
Enjeux liés aux nuisances (bruit)
Sondages géotechniques
Monuments historiques
Voirie et réseaux divers
Transport routier
Transport ferroviaire
Lignes électriques
Adduction d'eau potable
Assainissement : eaux usées, pluviales (voirie/toiture)
Conduite de gaz
Lignes téléphoniques
Chaleur urbaine
Eclairage public
Signalisation du trafic
Equipements urbains
Gares, hubs de trasport
Relais de communications
Services publics (pompiers, hôpitaux, écoles, police)
Végétation urbaine (parks, arbres)
Maquette urbaine / maquette paysagère

Données intelligentes (senseurs)
Données météorologiques
Qualité de l'air
Circulation routière en temps réel

Cette liste générale d'enjeux va ensuite être affinée car tous ne sont pas présents sur la zone d'étude ou parce que la donnée correspondante n'est pas toujours accessible (liste finale Figure 11). Il s'ensuit alors une réflexion sur la manière d'organiser la donnée collectée et sur les combinaisons pertinentes avec les jeux de données BIM. Cette réflexion est matérialisée dans le concept de la maquette intégrée.

5.2. Concept de la maquette numérique intégrée

Le concept de la maquette numérique intégrée est le résultat d'une série de questionnement sur les besoins des utilisateurs ainsi que sur les réponses à y apporter. Les utilisateurs de la maquette seront le BIM Manager ainsi que les ingénieurs de la construction du groupe OTE, qui ont des attentes aussi bien sur le fond:

- évaluer la faisabilité du projet en identifiant les contraintes réglementaires et physiques présentes sur le site
- avoir un inventaire de l'existant en termes de réseau et d'équipement urbain
- articuler l'aménagement du site au regard des services à proximité (desserte, transport) et des nuisances (bruit, qualité de l'air).

Que sur la forme:

- la maquette doit proposer l'ensemble des couches SIG utiles à la conception du bâtiment
- elle doit être utilisable par plusieurs utilisateurs simultanément
- elle doit offrir des possibilités d'interaction et d'analyse : consulter les entités, prendre des mesures (de longueur, d'aire), évaluer l'intervisibilité
- dans la logique de travail collaboratif qui est au coeur du BIM, la maquette doit idéalement être éditable ou permettre l'ajout d'éléments graphiques et/ou textuels.

La maquette se décline en plusieurs scènes 3D, car d'une part cela facilite la gestion et l'affichage du nombre important de couches de données, et d'autre part parce que chaque scène peut être organisée pour répondre à un besoin différent. L'approche retenue est celle du cycle de vie de la construction. En effet, la finalité de la maquette évolue en fonction de l'avancement du projet et l'utilisateur ne la consultera pas pour les mêmes besoins dans la phase de conception du bâtiment que dans la phase de son exploitation. Dans la littérature (voir section 2.5.3), la distinction des applications BIM-SIG se fait en fonction de la phase du projet et nous avons donc choisi de construire notre maquette en fonction du cycle de vie du PEX, que l'on peut décomposer en quatre étapes :

1. Esquisse et l'évaluation de la faisabilité (une scène)
2. Conception technique (une scène « travaux » et une scène « réseaux »)
3. Exploitation et gestion du bâtiment (une scène)
4. Déconstruction

Une scène pour la déconstruction/démolition a été considérée, cependant notre maquette ne contient pas d'informations relatives à cette phase (par exemple la quantité de matériau). En l'absence de telles informations, une maquette pour la déconstruction aurait été redondante avec celles de la conception, auxquelles l'utilisateur peut se référer.

Le schéma ci-après restitue le concept de la maquette, avec dans les colonnes gauche et droite les informations SIG et BIM alimentant les scènes 3D selon les phases de construction du bâtiment. Chaque scène est décrite par les besoins de ses utilisateurs ainsi que par une liste de fonctionnalités qui amélioreront leur expérience. Ces fonctionnalités ont été portées dans la matrice de comparaison des outils *ArcGIS Online* dans la section 7.

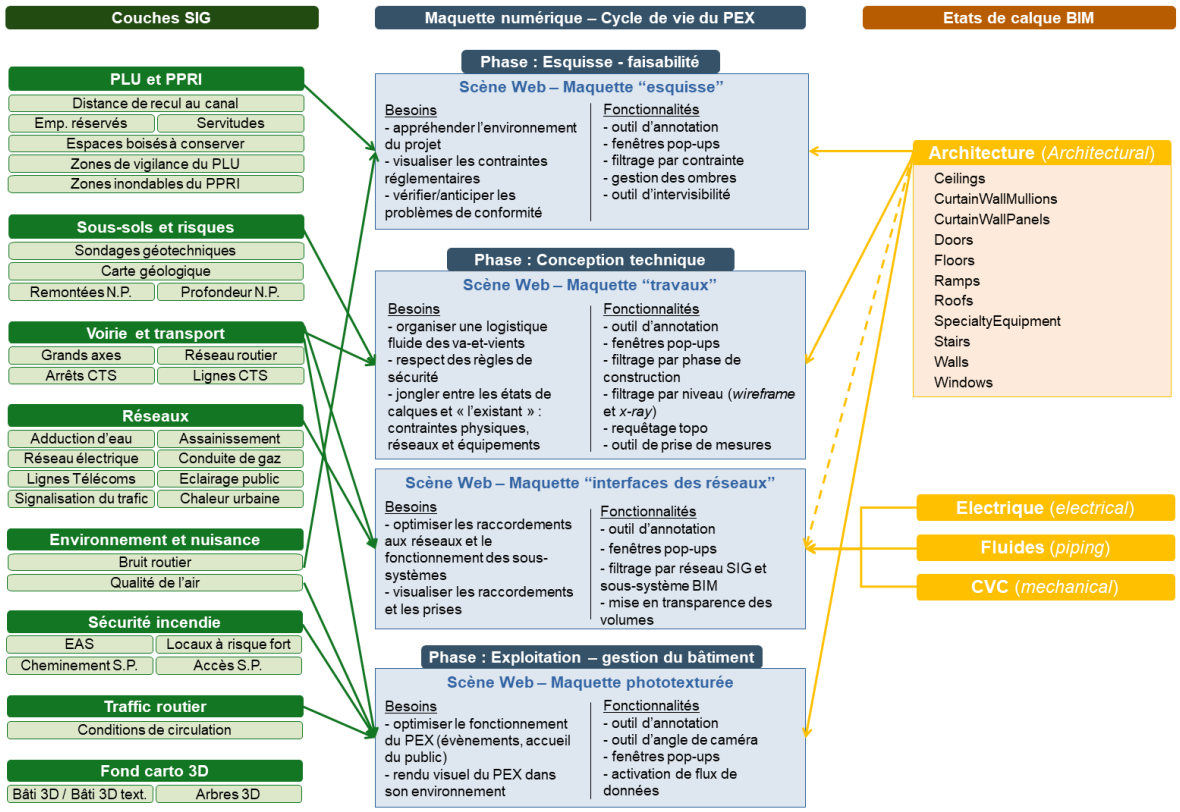

Figure 11 : synthèse de l'intégration de la maquette du PEX dans un SIG

Le but de notre maquette n'est pas d'avoir une interface exhaustive avec toutes les couches disponibles à visualiser, mais d'avoir des scènes « équipées » aux plus proches des besoins de chaque phase.

6. Données et traitements

Les données correspondantes aux couches SIG identifiées pour le concept de la maquette sont organisées dans une base de données locale (de format ESRI *File GeoDatabase*). Les sections suivantes décrivent pour chaque jeu de données de la FGDB : les couches, les sources, le mode de représentation et si besoin les traitements effectués.

Le système de référence choisi pour notre étude est le Web Mercator (EPSG : 3857), nécessaire pour afficher des couches compatibles avec les fonds de plan ESRI dans les « scènes 3D locales ». Les couches ont été sélectionnées ou traitées selon deux emprises : soit celle du site, soit celle de la zone d'étude (correspondant à une portion du quartier).

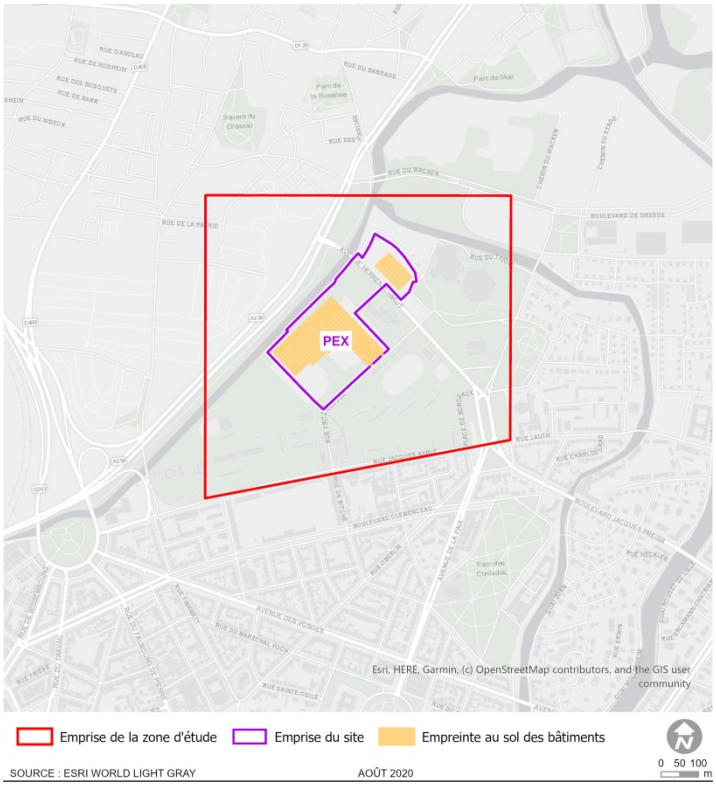

Figure 12 : zone d'étude et site de construction (OTE Ingénierie)

6.1. Constitution de la base de données projet

6.1.1. Données du PLUi de l'Eurométropole Strasbourg

Tableau 4 : classes d'entités du PLUi de Strasbourg

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
CONTINUITE_ECOLOGIQUE	Polygone	Symbole unique	Espaces contribuants aux continuités écologiques
EMPLACEMENTS_RESERVES	Polygone	Symbole unique	Emprises des emplacements réservés
ESPACES_BOISES	Polygone	Symbole unique	Espaces plantés à conserver

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
LIMITE_UE1	Polygone	Symbole unique	Limite de la zone UE 1
PRESCRIPTION_L	Ligne	Symbole unique	Distance de recul au cours d'eau

Sources : Géoportail de l'Urbanisme, données géographiques du PLUi de Strasbourg. « Standard CNIG PLU v2017c », pour la clé de lecture des attributs.

Traitements :

1. Extraction / création :

LIMITE_UE1	Toutes les autres couches
Données d'entrée : Shapefile des zones urbaines	Données d'entrée : Shapefile des prescriptions linéaires ou surfaciques
Sélection manuelle	Sélection par attribut : - "TYPEPSC" = '15' AND "STYPEPSC" = '00' (PRESCRIPTION_L) - "TYPEPSC" = '07' AND "STYPEPSC" = '00' (ESPACES_BOISES) - "TYPEPSC" = '05' AND "STYPEPSC" = '00' (EMPLACEMENTS_RESERVES) - "TYPEPSC" = '25' AND "STYPEPSC" = '00' (CONTINUITE_ECOLOGIQUE)

   - Sélection par localisation :
     - Intersectent zone d'étude
2. Import dans la FGDB :
   - Outil *Feature Class to Feature Class*
     - Couches en entrée : Couches produites en 1.
     - CRS de sortie : WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
     - Transformation géographique : RGF_1993_To_WGS_1984_1
3. Ajout de champs attributaires
   - Outil *Add Field*
     - Double : hauteurs d'extrusion éventuelles pour la scène 3D sur *AGOL*
     - Texte : lien vers les pièces écrites du PLU

6.1.2. Servitudes d'utilité publique

Tableau 5 : classes d'entités des SUP

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
PERIMETRE_MH	Polygone	Catégorique (MH inscrit ou classé)	Périmètre de protection des monuments historiques
PROTECTIONS_PERTURBATIONS_EM_PT1	Polygone	Symbole unique	Protection des centres de réceptions radioélectriques contre la perturbation électromagnétique
PROTECTIONS_PERTURBATIONS_EM_PT2	Polygone	Catégorique (secteur de	Protection des centres radioélectriques d'émission et

		dégagement)	de réception contre les obstacles

Sources : récupérées par OTE auprès des Services de l'Etat (DDT 67).

Traitements :

1. Extraction / création
   - Découpage (*clip*) sur l'emprise de la zone d'étude
     - Données d'entrée : Shapefile des servitudes
     - Couche de découpe : zone d'étude
2. Import dans la FGDB :
   - Outil *Feature Class to Feature Class*
     - Couches en entrée : Couches produites en 1.
     - CRS de sortie : WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
     - Transformation géographique : RGF_1993_To_WGS_1984_1
3. Ajout de champs attributaires
   - Outil *Add Field*
     - Double : hauteurs d'extrusion éventuelles pour la scène 3D sur *AGOL*
     - Texte : lien vers les pièces écrites du PLU

6.1.3. Risques et sous-sol

Tableau 6 : classes d'entités des risques et des sous-sols

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
COTE_PIEZOMETRIQUE	Ligne	Couleurs graduées (hauteur NGF)	Côtes piézométriques des remontées de nappe
GEO050K_HARM_067_S_FGEOL_CGH	Polygone	Catégorique (description)	Composition géologique du sous-sol
ISOPIEZES_NAPPE	Ligne	Catégorique (hauteur NGF)	Côtes piézométriques des profondeurs de nappe
MAILLE_REMONTEE_Z	Polygone	Couleurs graduées (hauteur NGF)	Interpolation des profondeurs de remontée de nappe
NAPPE_MAILLAGE_Z	Polygone	Couleurs graduées (hauteur NGF)	Interpolation de la profondeur de nappe
PPRI_INONDATION	Polygone	Catégorique (Zonage PPRi)	Zonage du PPRI - débordements de cours d'eau
PPRI_NAPPE	Polygone	Catégorique (Zonage PPRi)	Zonage du PPRI - remontées de nappe
SONDAGES_GEOTECH	Point	Symbole unique	Points des forages des sondages du sous-sol
VIGILANCE_PPA	Polygone	Symbole unique	Zone de vigilance du PLU : Plan de Protection Atmosphérique

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
VIGILANCE_SOL_POLLUE	Polygone	Symbole unique	Zone de vigilance du PLU : sites et sols pollués

Sources : Portail Géorisques, données du BRGM (BD PPRn, Zonages Inondation, Inondations par remontée de nappe et flux WFS pour la géologie).

Géoportail de l'Urbanisme, données géographiques du PLUi de Strasbourg (couches des zones de vigilance).

Fondasol (sondages géotechniques).

Traitements :

1. Extraction / création :

VIGILANCE_PPA, VIGILANCE_SOL_POLLUE
Données d'entrée : Shapefile des prescriptions surfaciques
Sélection par attribut : - "TYPEPSC" = '02' AND "STYPEPSC" = '00' (VIGILANCE_PPA) - "TYPEPSC" = '02' AND "STYPEPSC" = '02' (VIGILANCE_SOL_POLLUE)
VIGILANCE_PPA, VIGILANCE_SOL_POLLUE, PPRI_NAPPE, PPRI_INONDATION, GEO050K_HARM_067_S_FGEOL_CGH
Données d'entrée : Shapefile des prescriptions surfaciques, zonage PPRi, carte géologique
Découpage (*clip*) - Couche de découpe : zone d'étude
COTE_PIEZOMETRIQUE, ISOPIEZES_NAPPE
Données d'entrée : Shapefile des contours piézométriques
Sélection par localisation : - Intersectent zone d'étude
NAPPE_MAILLAGE_Z, MAILLE_REMONTEE_Z
Données d'entrée : COTE_PIEZOMETRIQUE, ISOPIEZES_NAPPE
Outil *Topo To Raster* - Emprise de sortie : identique aux données d'entrée - Champ de hauteur : "ngf" (ISOPIEZES_NAPPE), "HAUTEUR" (COTE_PIEZOMETRIQUE) - Taille des cellules en sortie : 100m (ISOPIEZES_NAPPE), 50m (COTE_PIEZOMETRIQUE)
Outil *Fishnet* (création des mailles) : - Emprise : identique aux rasters de l'étape précédente - Largeur et hauteur de cellule : 50m pour MAILLE_REMONTEE_Z et 100m pour NAPPE_MAILLAGE_Z
Outil *Centroïdes de polygones* (dans QGIS, génère les points des centroïdes des mailles) - Couche en entrée : mailles
Outil *Extract Values to Points (*pour écrire les hauteurs du raster dans les centroïdes) - Couche de points en entrée : centroïdes - Couche raster en entrée : sortie de *Topo to Raster*
Outil *Add Join* (jointure des centroïdes avec les cellules des mailles - "centroïdes.OID" = "maille.OBJECTID"
Outil *Feature class to feature class* - Couche en entrée : mailles avec jointure - Couche en sortie : Shapefiles temporaires
Outil *Set Z-value* (dans QGIS) - Couche en entrée : Shapefiles temporaires des mailles jointes - Valeur Z : paramétrée sur les champs contenant les hauteurs

2. Import dans la FGDB :
    - Outil *Feature Class to Feature Class*

— Couches en entrée : Couches produites en 1.
— CRS de sortie : WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
— Transformation géographique : RGF_1993_To_WGS_1984_1

3. Ajout de champs attributaires
   - Outil *Add Field*
     — Double : hauteurs d'extrusion éventuelles pour la scène 3D sur *AGOL* (positives ou négatives pour les sous-sols)
     — Texte : lien vers les graphes des sondages (SONDAGES_GEOTECH)

6.1.4. Voirie et transport

Tableau 7 : classes d'entités des transports et de la voirie

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
OSM_AUTOROUTE	Ligne	Symbole unique	Tronçons autoroutiers OSM
OSM_CTS_ARRETS	Point	Catégorique (par classe d'arrêt)	Arrêts des transports publics
OSM_CTS_LIGNES	Ligne	Symbole unique	Lignes de tram
OSM_ROUTE	Ligne	Catégorique (par classe de route)	Tronçons de route OSM

Source : base de données OpenStreetMap (téléchargée depuis le site GeoFabrik).

Traitements :

1. Extraction / création

OSM_ROUTE	Toutes les autres couches
Données d'entrée : gis_osm_roads_free_1	Données d'entrée : gis_osm_roads_free_1, gis_osm_transport_free_1, gis_osm_railways_free_1
Outil découpage (*clip*) - Couche de découpe : zone d'étude	Sélection manuelle

2. Import dans la FGDB :
   - Outil *Feature Class to Feature Class*
     — Couches en entrée : Couches produites en 1.
     — CRS de sortie : WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
     — Transformation géographique : RGF_1993_To_WGS_1984_1

6.1.5. Réseaux existants

Tableau 8 : classes d'entités des réseaux existants

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
ASSAINISSEMENT	Ligne	Symbole unique	Conduites d'évacuation des eaux usées
CHALEUR_URBAINE	Ligne	Symbole unique	Conduites du réseau de chaleur urbaine

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
CHALEUR_URBAINE_STATION	Polygone	Symbole unique	Station de distribution de chaleur urbaine
CONNEXIONS	Point	Catégorique (par type de réseau)	Points de raccordement
EAU	Ligne	Symbole unique	Adduction en eau potable
EAU_POTEAU_INCENDIE	Point	Symbole unique	Poteaux d'incendie
ELEC_ARMOIRE	Point	Symbole unique	Armoires électriques
ELECTRICITE	Ligne	Catégorique (en ou hors service)	Lignes électriques
ELECTRICITE_TRANSFO	Polygone	Symbole unique	Postes de transformation
EP_AERIEN	Ligne	Symbole unique	Lignes électriques de l'éclairage public (aériennes)
EP_LAMPADAIRE	Point	Symbole unique	Lampadaires
EP_SOUTERRAIN	Ligne	Symbole unique	Lignes électriques de l'éclairage public (enterrées)
GAZ_NATUREL	Ligne	Symbole unique	Conduites de distribution de gaz
SIGNALISATION	Ligne	Symbole unique	Lignes électriques de la signalisation routière
SIGNALISATION_FEU	Point	Symbole unique	Feu de circulation
TELECOM	Ligne	Symbole unique	Lignes téléphoniques ou de fibre
TELECOM_REGARD	Polygone	Symbole unique	Regards des lignes de télécommunication
VRD_REGARD	Polygone	Symbole unique	Regards des réseaux divers

Sources : plans récupérés par OTE auprès des différents opérateurs.

Traitements :

1. Extraction / création

Réseaux humides, éclairage public et réseaux de signalisation	**Réseaux électriques, gaz, chaleur urbaine et télécom**
Données d'entrée : fichier DAO (DWG)	Données d'entrée : plan au format PDF
Sélection manuelle	Outil *Georeference* Outil *Edit* - Numérisation des entités directement dans des classes de la FGDB

2. Import dans la FGDB :
   - Outil *Feature Class to Feature Class*
     - Couches en entrée : sélections créées en 1.
     - CRS de sortie : WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
     - Transformation géographique : RGF_1993_To_WGS_1984_1
3. Ajout de champs attributaires

- Outil *Add Field*
  - — Double : profondeurs d'enfouissement pour la scène 3D sur *AGOL*
  - — Double : diamètres des lignes pour la scène 3D sur *AGOL*

Les diamètres des réseaux varient de 0,2m à 0,4m ; les profondeurs de 0,4m à 2,1m selon le schéma suivant :

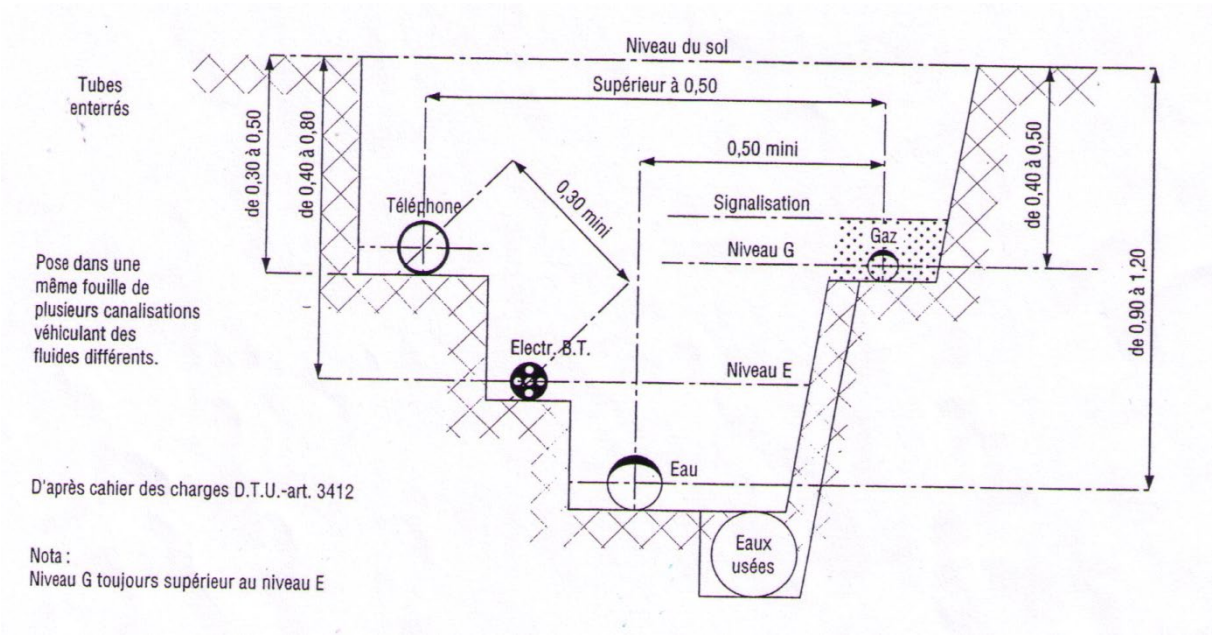

Figure 13 : profondeurs d'enfouissement des réseaux (Totalgaz)

6.1.6. Réseaux projetés

Tableau 9 : classes d'entités des réseaux projetés

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
AEP_CONDUITES	Ligne	Symbole unique	Adduction en eau potable
AEP_EQUIPEMENT	Polygone	Symbole unique	Equipements et regards des conduites d'eau potable
AEP_INC	Ligne	Symbole unique	Conduites d'eau d'incendie
AEP_INC_POTEAU	Point	Symbole unique	Poteaux d'incendie
CFA_CONDUITES	Ligne	Symbole unique	Lignes de courant électrique faible
CFA_EQUIPEMENT	Polygone	Symbole unique	Equipements et regards des courants faibles
ECL_CONDUITES	Ligne	Symbole unique	Lignes électriques de l'éclairage extérieur
ECL_POINTS	Point	Symbole unique	Luminaires extérieurs
ELEC_EQUIPEMENT	Polygone	Symbole unique	Equipements électriques (regards, armoires)
ELEC_HT_CFO	Ligne	Symbole unique	Lignes de courant électrique

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
			fort
ELEC_PRISES	Polygone	Symbole unique	Bornes de prises électriques
EP_AVALOIR	Polygone	Symbole unique	Avaloir des eaux pluviales
EP_BASSINS	Polygone	Symbole unique	Bassins de collecte des eaux pluviales
EP_CONDUITES	Ligne	Symbole unique	Conduites d'évacuation des eaux de pluie
EP_EQUIPEMENT	Polygone	Symbole unique	Équipements d'évacuation des eaux de pluie
EU_CONDUITES	Ligne	Symbole unique	Conduites d'évacuation des eaux usées
EU_EQUIPEMENT	Polygone	Symbole unique	Équipements d'évacuation des eaux usées
GAZ_CONDUITES	Ligne	Symbole unique	Conduites de gaz
PAC_CONDUITES	Ligne	Symbole unique	Conduites de la pompe à chaleur

Source : groupe OTE

Traitements :

1. Extraction / création
   - Sélection manuelle
     - Données d'entrée : Fichiers DAO (DWG)
2. Import dans la FGDB :
   - Outil *Feature Class to Feature Class*
     - Couches en entrée : sélections créées en 1.
     - CRS de sortie : WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
     - Transformation géographique : RGF_1993_To_WGS_1984_1
3. Ajout de champs attributaires
   - Outil *Add Field*
     - Double : profondeurs d'enfouissement pour la scène 3D sur *AGOL*
     - Double : diamètres des lignes pour la scène 3D sur *AGOL*

6.1.7. Données sur l'environnement

Tableau 10 : classes d'entités de l'environnement

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
BRUIT_ROUTIER	Polygone	Couleurs graduées (db)	Zones exposées au bruit routier (jour, soir, nuit)

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
EAU_SURFACIQUE	Polygone	Unique	Cours d'eau

Sources : portail OpenData de l'EuroMétropole de Strasbourg (BRUIT_ROUTIER).

Base de données OpenStreetMap (EAU_SURFACIQUE)

Traitements :

1. Extraction / création

BRUIT_ROUTIER	EAU_SURFACIQUE
Données d'entrée : Shapefile du bruit routier (emprise de Strasbourg)	Données d'entrée : gis_osm_water_a_free_1.shp
Découpage (*clip*) - Couche de découpe : zone d'étude	Sélection manuelle Outil *Edit* - *Split* - *Reshape feature* (pour réduire la largeur)

2. Import dans la FGDB :
   - Outil *Feature Class to Feature Class*
     - Couches en entrée : sélections créées en 1.
     - CRS de sortie : WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere
     - Transformation géographique : RGF_1993_To_WGS_1984_1

6.1.8. Maquette numérique 3D de l'environnement

Tableau 11 : classes d'entités de la maquette 3D de l'environnement

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
ARBRE	Point	Symbole unique	Peuplement d'arbres
BATI_TEXTURE	MultiPatch	Symbole unique	Modèles 3D du bâti : avec texture photographique
BATI_THEMATIQUE	MultiPatch	Catégorique (type d'utilisation)	Modèles 3D du bâti : sans texture

Source : portail OpenData de l'EuroMétropole de Strasbourg

Traitements :

1. Extraction / création

ARBRE
Données d'entrée : Shapefile des arbres pour la dalle 2125 (LoD1)
Sélection par localisation : - A l'intérieur de zone d'étude

2. Import dans la FGDB :

ARBRE
Outil *Feature Class to Feature Class* : - Couches en entrée : sélection créée en 1.

BATI_TEXTURE, BATI_THEMATIQUE
Données d'entrée : dalle 2125 au format OBJ : Bati3D LoD1 (BATI_THEMATIQUE), Bati3D LoD2 (BATI_TEXTURE)
Outil *Import 3D Files* (traitements par lots)

- *Batch parameter* : File Suffix
- Système de coordonnées : RGF_1993_CC48
- *Batch File Suffix* : OBJ

Sélection de toutes les entités

Outil *Edit – Move To*

- *Method* : Delta
- X : 2035000, Y : 7255000

3. Ajout de champs attributaires
    - Outil *Add Field*
        - Double : hauteur de couronne : Hauteur_m = int(!Hauteur!) (ARBRE)
        - Double : rayon de couronne : Rayon_m = int(!RayonHoupp!) (ARBRE)
        - Texte : type du bâti (BATI_THEMATIQUE)

6.1.9. Sécurité incendie

Tableau 12 : classes d'entités de la sécurité incendie

Couche	Géométrie	Représentation	Contenu
CHEMINEMENT_POMPIER	Polygone	Symbole unique	Cheminement des pompiers dans les étages
EAS	Polygone	Symbole unique	Espaces d'attentes sécurisés
LOCAL_A_RISQUE	Point	Symbole unique	Locaux à risques importants
OUVRANT_POMPIER	Point	Symbole unique	Accès pompier aux étages

Sources : Groupe OTE, Plan des Systèmes de Sécurité Incendie

Traitements :

1. Extraction / création
    - Données d'entrée : Plan SSI au format PDF
    - Outil *Edit*
        - Numérisation des entités directement dans des classes de la FGDB

6.1.10. Modèle Numérique de Terrain

Source : portail OpenData de l'EuroMétropole de Strasbourg

Traitements :

1. Import dans la FGDB
    - Données en entrée : dalles du MNT 2015 texturé 2018 au format OBJ (colonnes 83 à 88 et rangées 99 à 104)
    - Outil *Import 3D Files* (traitement par lots) :
        - *Batch parameter* : File Suffix
        - Système de coordonnées : RGF_1993_CC48
        - *Batch File Suffix* : OBJ
2. Déplacer les entités

- Sélection de toutes les entités
- Outil *Edit – Move To*
  - Method : Delta
  - X : 2035000, Y : 7255000

3. Créer une couche de points
   - Outil Feature Vertices to Points
     - Couches en entrée : MNT importés en *MultiPatch* en 1.
     - Tous les sommets
4. Interpolation d'un raster MNT
   - Outil *IDW*
     - Couches en entrée : les points de l'étape précédente
     - *Value Field* : *Shape.Z*
     - *Cell size* : 1
     - Autres paramètres : par défaut
5. Afin d'aplanir localement le MNT qui présente du relief sur l'emprise du site (correspondant probablement aux anciens bâtiments), un calque DWG de points topo en NGF est interpolé en raster
   - outil *IDW*
     - Cell size : 1
     - *Value Field* : *Elevation*
6. Le raster interpolé du DWG est appliqué sur le raster du MNT
   - Outil *Mosaic*
     - Zones de superposition : valeurs interpolées du DWG écrasent celles du MNT d'origine
7. Reprojection en Web Mercator (EPSG:3857)
   - outil *Project Raster*
     - Couche en entrée : le raster corrigé

6.2. Mise en ligne des données SIG

Les classes d'entités créées précédemment sont mises en ligne sur *ArcGIS Online* afin de pouvoir être ajoutées à des scènes 3D. On distingue quatre types de couches en ligne:

Les couches de scènes

Les couches de scènes ne concernent que les modèles 3D utilisés en fond de scène, à savoir ARBRE, BATI_TEXTURE, BATI_THEMATIQUE. Les outils *Create Point Scene Layer Package* et *Create 3D Object Scene Layer Package* permettent de générer les fichiers SLPK qui sont ensuite téléversés sur *ArcGIS Online.* Lors de la création des paquets de couche de scène, il est possible de reprojeter les données. Les entités sont donc reprojetées en *Web Mercator* à cette étape-ci, raison pour laquelle elles ont été importées dans la FGDB dans leur SCR d'origine (RGF93 CC48), contrairement aux autres classes d'entités.

Les couches d'entités

Les couches d'entités contiennent toutes les autres classes d'entités. Dans *ArcGIS Pro*, un clic-droit sur une couche du panneau *Contenu* permet d'accéder au menu *partage*, puis *partage en tant que couche scène.* Le menu de mise en ligne permet de remplir les métadonnées et de choisir le type « couche d'entités » avant la publication. La mise en ligne se fait couche par couche, mais au préalable, il est nécessaire de configurer les *pop-ups* de la couche afin que seul les attributs pertinents apparaissent lorsque l'utilisateur requête une entité dans la scène.

Les couches d'élévation

Le MNT est ajouté comme source d'élévation à une scène locale dans *ArcGIS Pro.* La scène est ensuite partagée sur *ArcGIS Online*, puis supprimée ainsi que toutes ses couches, sauf le MNT.

Les couches tuilées (*Tile Layers*)

Deux couches sont directement créées dans le contenu d'*ArcGIS Online* à partir de flux WMS récupérés auprès de AtMO Grand Est (les concentrations de NOx et de PM10).

6.3. Préparation de la Maquette BIM

La maquette numérique du PEX est composée de cinq fichiers *Revit* :

- STG_KAA_ARC_00.rvt : pour les Halls 1 à 4 et la Nef d'entrée
- STG_KAA_ARC_00_HALL_5.rvt : pour le Hall 5 (à côté du PMC)
- STG_KAA_ARC_01_PRK.rvt : pour le parking silo
- STG_KAA_ARC_11_SIT.rvt : pour le parvis urbain et le parking extérieur
- STG_OTE_MEP.rvt : pour les réseaux électriques, la ventilation et les conduites

A l'intérieur de chaque fichier *Revit* se trouvent les jeux de données suivants:

- *Architectural* : contient les modèles de tous les éléments architecturaux (murs, façades, cloisons, planchers, fenêtres, toits, portes) et ornementaux (équipements, mobiliers, décorations, verdure).

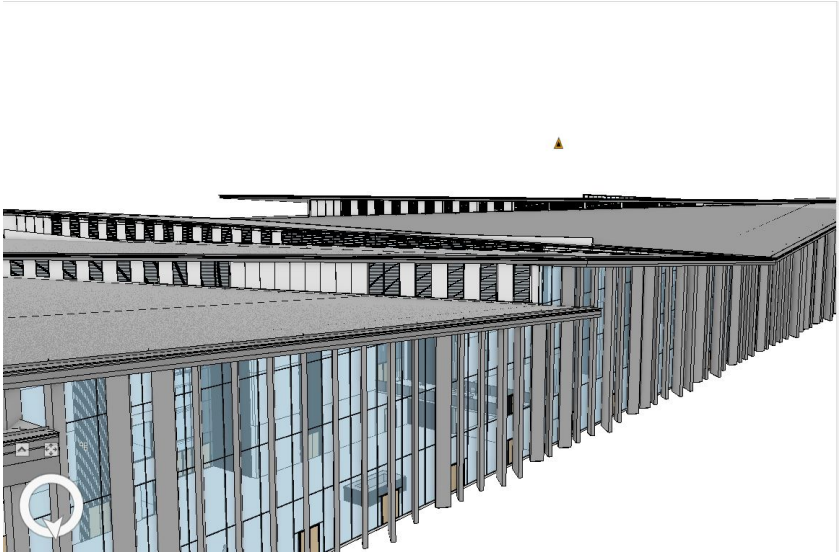

Figure 14 : maquette architecturale

- *Electrical* : contient les équipements électriques (armoires, gaines de câbles, téléphones, interrupteurs, luminaires).
- *Mechanical* : contient les systèmes de ventilation.
- *Piping* : contient le détail des conduites et de la plomberie.
- *Structural* : contient les modèles des structures portantes (colonnes, piliers, poutres, cadres d'acier).

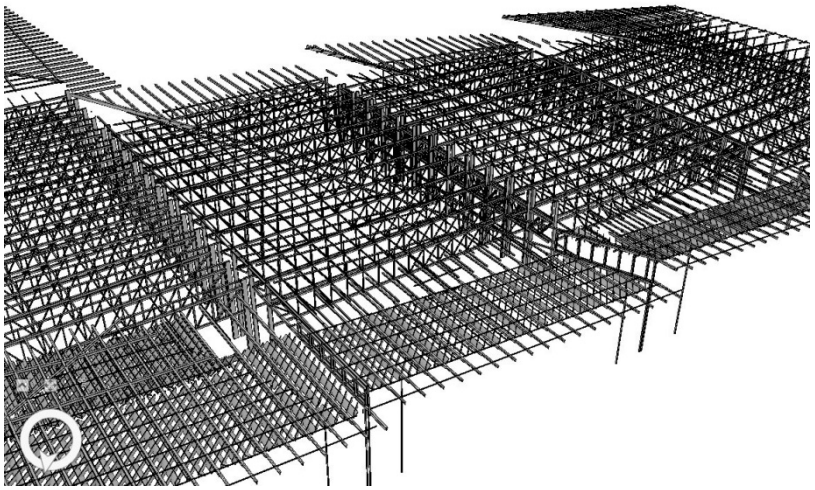

Figure 15 : maquette structurelle

Mechanical, *Electrical* et *Piping* ne sont renseignés que dans STG_OTE_MEP et vides dans les autres maquettes.

L'objectif est de mettre en ligne une maquette du PEX sur *ArcGIS Online* au format *Building Scene Layer Package* afin que ses propriétés intrinsèques de bâtiment soient conservées (par exemple : étage, phase de construction, famille d'objet, textures et couleurs). Cette section présente la série de traitement qui permet de parvenir au format SLPK à partir des fichiers RVT.

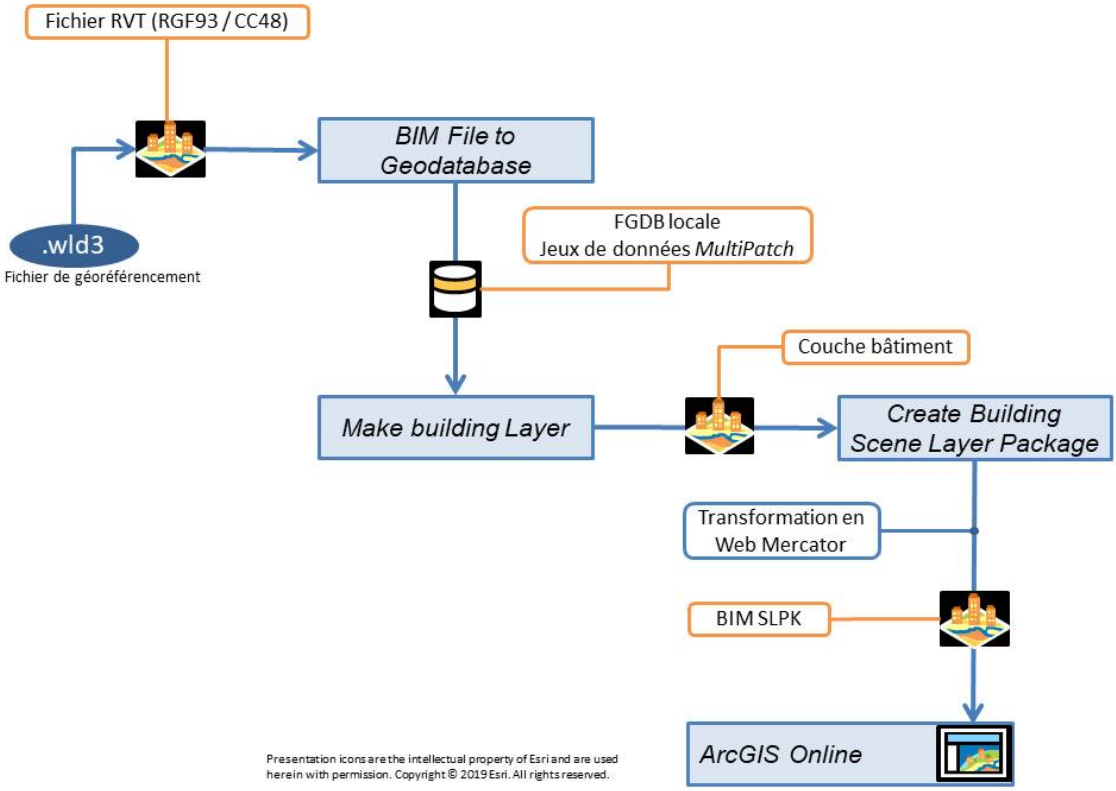

Figure 16 : chaîne des traitements de la maquette BIM

6.3.1. Géoréférencement et import

Les fichiers *Revit* sont lus dans *ArcGIS Pro* directement par glisser/déposer. Toutes les maquettes sont déjà géoréférencées sauf la maquette MEP. Pour la géoréférencer, nous utilisons la couche *LocationPoints* contenue dans le calque *Architectural.* Le *LocationPoints* contient le *Project Base Point* et le *Survey Point*. Le premier point correspond à l'origine du système de coordonnées cartésiennes du projet *Revit*, tandis que le second représente sa position dans un système de coordonnées de référence (coordonnées géographiques ou projetées) (ESRI, 2020). En chargeant un *Project Base Point* d'une des maquettes déjà géoréférencées, nous pouvons déplacer le *Project Base Point* du MEP à l'emplacement correct au moyen de l'outil *Georeference* du ruban *Building >> Manage*.

Les fichiers *Revit* n'étant pas éditables dans *ArcGIS Pro*, l'outil de géoréférencement ne déplace pas véritablement le *Project Base Point*, mais écrit une correction géométrique dans un fichier de géoréférencement 3D (fichier texte avec extension *.wld3*). *ArcGIS* applique la correction et re-calcule toute les géométries de la maquette par rapport au *Project Base Point* corrigé. L'avantage est que ce fichier WLD3 peut être réutilisé pour d'autres maquettes devant être positionnées sur le même point. Il suffit de le renommer comme le projet *Revit* (ESRI, 2020).

Chaque maquette *Revit* est ensuite importée dans la FGDB au moyen de l'outil *BIM File to Geodatabase*, qui convertit les couches du BIM en *MultiPatch*. Les *MultiPatch* ne sont plus organisés en calques, mais rangés directement dans un jeu de donnée (*dataset*) correspondant à la maquette. Le SCR est le RGF1993 CC48.

6.3.2. Tri des états de calques

Afin d'avoir une expérience de navigation aisée dans la scène 3D, la maquette du bâtiment doit répondre à deux impératifs :

- avoir un nombre de géométries gérable pour garantir un affichage fluide dans le navigateur
- être composée d'un seul modèle en tout et pour tout et non pas d'un modèle par bâtiment ou hall.

Sachant que l'outil *Make Building Layer* prend en entrée un jeu de donnée pour générer le modèle du bâtiment, il nous faut regrouper dans un même *dataset* les *MultiPatch* que nous voulons voir dans la maquette finale. Pour répondre aux exigences du projet (voir section 5.2), nous créerons deux maquettes : une enveloppe BIM et une maquette MEP.

Figure 17 : maquette MEP (electrical) et enveloppe BIM en transparence

Un nouveau *dataset* est donc créé dans la FGDB : ARCHI_SIMPLE pour l'enveloppe architecturale simplifiée. Chaque *MultiPatch* du bâtiment principal est fusionné dans le nouveau *dataset* avec son équivalent du Hall 5, du parking silo et du parvis grâce à l'outil *Merge.* Cette opération n'est effectuée que pour les *MultiPatch* appartenant au calque *Architectural.*

Dans le jeu de données MEP, nous ne conservons que les *MultiPatch* des calques *Mechanical*, *Electrical* et *Piping.*

Le calque *Structural* est d'emblée exclu des deux maquettes, déjà lentes à afficher dans *ArcGIS Pro*, car il comporte de très nombreuses géométries et n'est pas indispensable à la compréhension de la maquette (la plupart des structures portantes ne sont pas visibles de l'extérieur et ne représentent pas de délimitations de volume).

Afin d'accélérer encore le rendu, tous les *MultiPatch* qui donnent à la maquette un niveau de détail trop élevé pour de la cartographie et dont la suppression affecte peu l'apparence externe du bâtiment, sont supprimés. Par exemple *Entourage* qui contient des modèles de visiteurs et *FurnitureSystems* qui contient le mobilier du restaurant.

Une exception notable est *Columns*, qui présente les colonnades externes du bâtiment, censées représenter une lisière de forêt, et qui est le marqueur architectural fort du projet. Ce calque a été supprimé à cause de la prépondérance visuelle des arêtes, qui masquent le bâtiment et les colonnes elles-mêmes lorsque l'on effectue un zoom arrière (voir Figure 18).

Tableau 13 : tri des couches dans les jeux de données maquette

Conservés	Supprimés
ARCHI_SIMPLE	
Ceilings *CurtainWallMullions* *CurtainWallPanels* *Doors* *Floors* *Ramps* *Roofs* *SpecialtyEquipment* *Stairs* *Walls* *Windows*	*Casework* *Columns* *Entourage* *ExteriorShell* *Furniture* *FurnitureSystems* *GenericModel* *Mass* *Parking* *Planting* *PlumbingFixtures* *Rooms* *Site* *StairsRailing* *Topography*
MEP	
AirTerminals *CableTray* *CableTrayFitting* *Conduit* *ConduitFitting* *DataDevices* *DuctAccessories* *DuctFitting* *Ducts* *ElectricalEquipment* *FlexDucts* *FlexPipes* *Floors*, ajouté depuis *Architectural* afin de faciliter l'interprétation (sinon les réseaux flottent en l'air) *MechanicalEquipment* *PipeAccessory* *PipeFitting* *Pipes* *Stairs*	*CommDevices* *ElectricalFixtures* *FireAlarmDevices* *LightingDevices* *LightingFixtures* *NurseCallDevices* *SecurityDevices* *Sprinklers* *TelephoneDevices*

Enfin, des entités ont été supprimées à l'intérieur de certains *MultiPatch* comme par exemple *CurtainWall*, notamment les surfaces redondantes avec d'autres, ou les surfaces purement ornementales et complexes. Un exemple typique sont les lamelles de bois ou d'acier plaquées aux murs et aux fenêtres et qui ont une fonction principalement décorative. Là aussi, en raison de la forme fine des objets, seules les arêtes noires sont visibles à moins de zoomer sur la surface en question.

Figure 18 : effets des ornements à longue distance

6.3.3. Création de la couche bâtiment

Les deux maquettes épurées sont créées avec *Make Building Layer.* Cet outil n'écrit pas de nouveaux fichiers, mais génère la maquette comme un groupe de couche dans le panneau des contenus d'*ArcGIS Pro*. Elle disparaît si le projet n'est pas sauvegardé.

Les maquettes de bâtiments sont enregistrées dans un paquet de couche de scène avec *Create Building Scene Layer Package*, qui est ensuite téléversé sur *ArcGIS Online*. Lors de l'empaquetage, les données sont reprojetées en Web Mercator.

6.4. Intégration en ligne et cycle de la donnée

Maintenant que toutes les données BIM et SIG sont sur la plateforme *ArcGIS Online*, leur intégration peut se faire en ligne. Quatre scènes 3D locales sont créées avec l'outil *SceneViewer* puis alimentées avec les couches d'entités ainsi que la maquette du bâtiment hébergées sur le portail de l'entreprise.

Dans une architecture de données idéale, la maquette intégrée est conçue pour requêter automatiquement les données à jour depuis un dépôt central (fichier de travail BIM ou base de données serveur). Le but étant de minimiser voire interdire la duplication de données tout en laissant les équipes BIM et SIG travailler de leurs côtés sur leurs jeux de données. En l'état actuel des technologies, un minimum de duplication est cependant nécessaire puisque les classes d'entités de la FGDB ainsi que la maquette BIM doivent être portés sur *ArcGIS Online* via des paquets et des couches afin d'être requêtées par les scènes 3D.

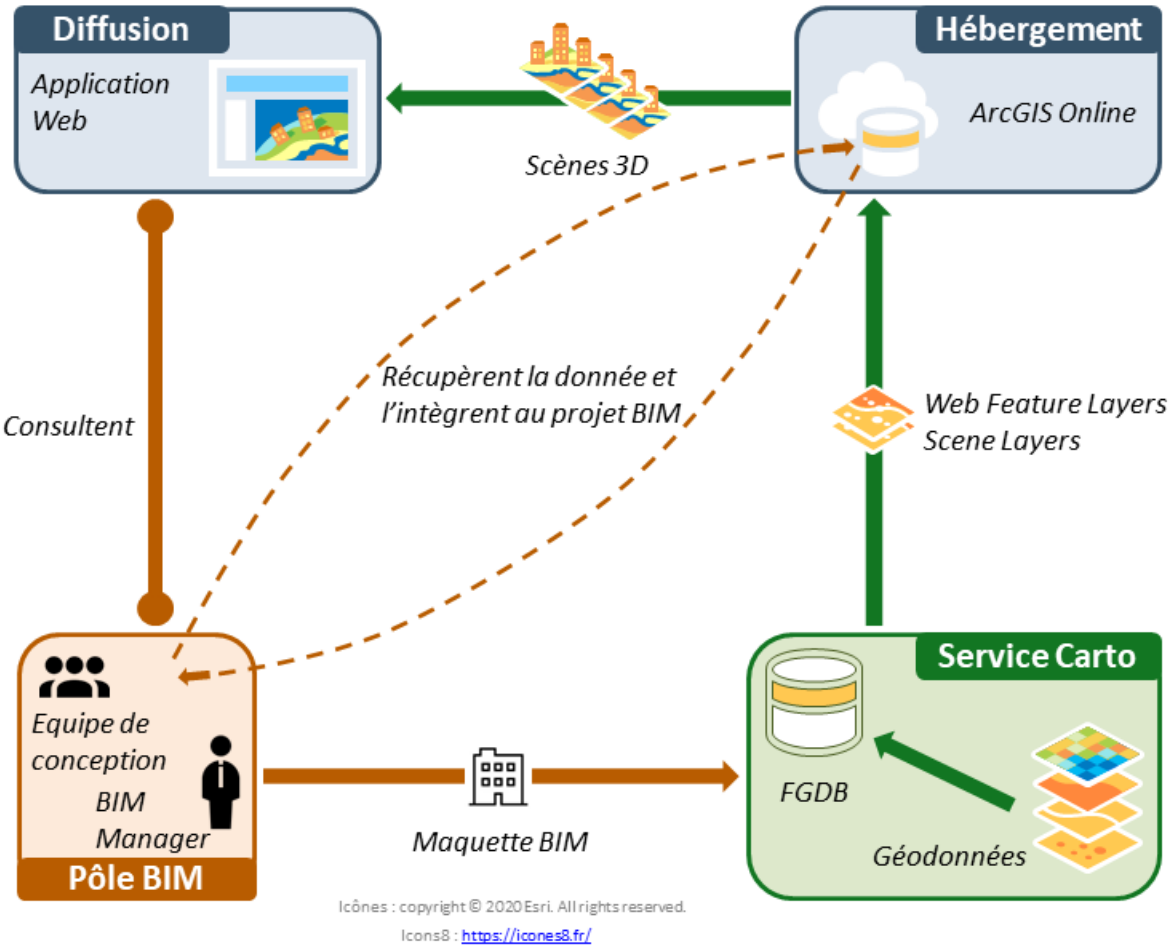

Figure 19 : cycle de la donnée

Le schéma ci-dessus résume le cycle de la donnée de la maquette intégrée du PEX. Le BIM Manager fournit à l'équipe de cartographie la dernière version de la maquette. Les cartographes la préparent dans leur SIG, développent les scènes en lignes autour de celle-ci et les alimentent avec de l'information géographique. Les couches géographiques sont rendues disponibles sur le portail *ArcGIS* de l'entreprise afin que l'équipe de conception et les ingénieurs BIM puissent les télécharger, si besoin, après avoir consulté les scènes 3D via une application web.

6.5. Description des scènes et rendu visuel

6.5.1. Scène 1 (esquisse - faisabilité)

Cette scène doit permettre aux concepteurs du PEX de visualiser les contraintes d'urbanisme s'exerçant sur et autour du site de construction afin d'anticiper d'éventuels problèmes de non-conformité. Les environnementalistes, les urbanistes et les ingénieurs acousticiens du Groupe OTE sont également susceptibles d'utiliser cette scène comme support pour leurs études.

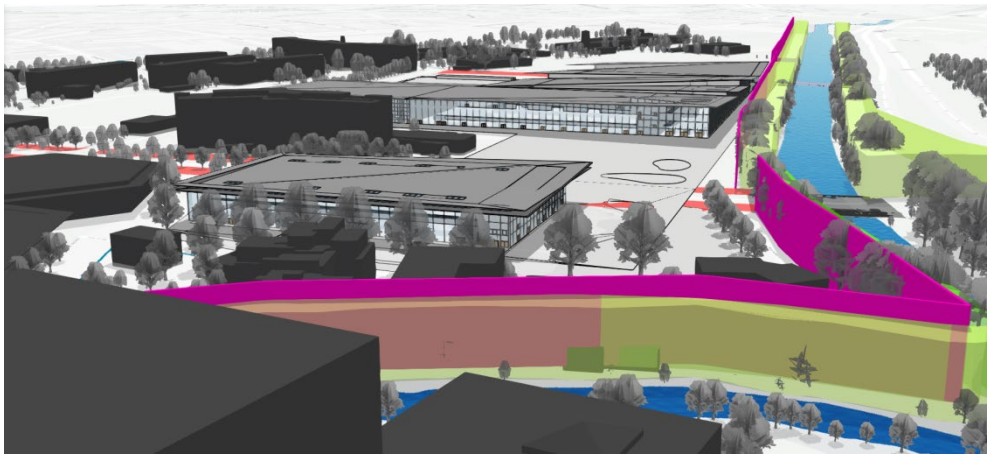

Figure 20 : rendu visuel de la scène 1

Les prescriptions du PLU, les servitudes ainsi que les zones de vigilance sont représentées par des volumes extrudés à partir des géométries 2D afin d'améliorer la visibilité des enjeux couvrant le bâtiment. Dans le cas des servitudes radioélectriques, les hauteurs d'extrusion sont les limites d'altitudes réelles. Les zones inondables sont drapées sur le sol, tandis que les zones exposées au bruit sont superposées au MNT avec un décalage de 2m vers le haut, ce qui correspond environ à une hauteur d'Homme.

6.5.2. Scène 2 (conception technique - travaux)

La première scène de la phase de conception présente certaines contraintes physiques à considérer lors de la construction. Cette scène s'adresse principalement aux chefs de projets et aux ingénieurs structure de l'équipe de maîtrise d'œuvre. Elle a pour finalité de constituer une base de connaissance, un support de conception. Afin de planifier l'organisation du chantier et l'accès au site, cette scène présente également les accès routiers et leurs caractéristiques.

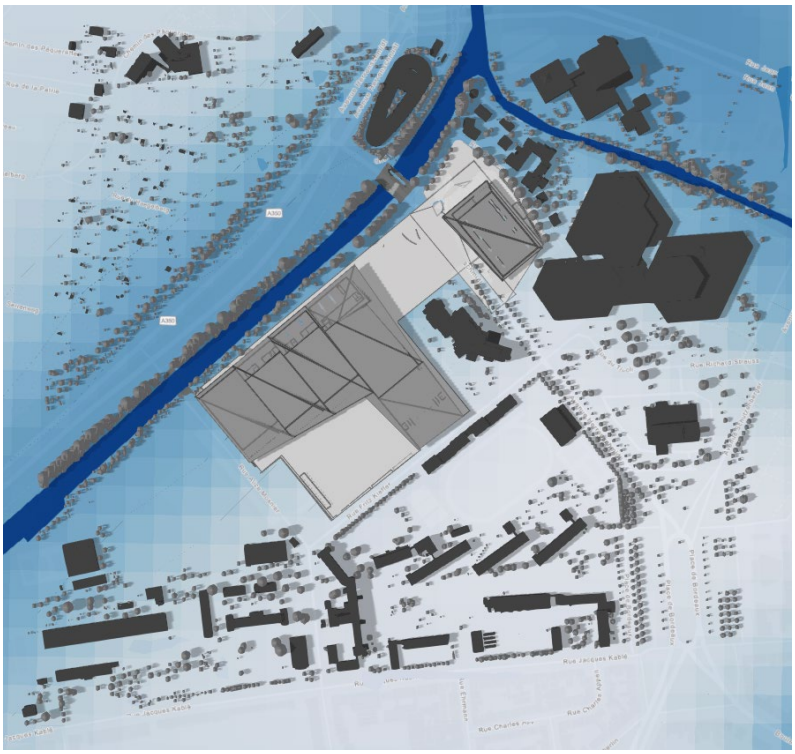

Figure 21 : rendu visuel de la scène 2

Les interpolations de profondeur et de remontée de nappe sont placées à leurs hauteurs Z absolues pour visualiser les zones d'affleurement ou de débordement par rapport au MNT de référence. Les couches géologiques ont été extrudées vers le bas afin de représenter le sous-sol, de même que les sondages géotechniques (représentés par la profondeur réelle du forage).

6.5.3. Scène 3 (conception technique - réseaux)

Cette seconde scène de la phase de conception permet de visualiser les réseaux existants et de planifier les points de raccordement avec les réseaux projetés. Elle a la particularité de présenter les calques MEP (*Mechanical, Electrical, Piping*) de la maquette BIM. L'enveloppe du bâtiment est mise en transparence. Les ingénieurs VRD, CVC et du génie électrique peuvent ainsi visualiser en 3D les installations projetées dans le contexte du quartier et vérifier que les exutoires et les raccordements prévus soient optimaux.

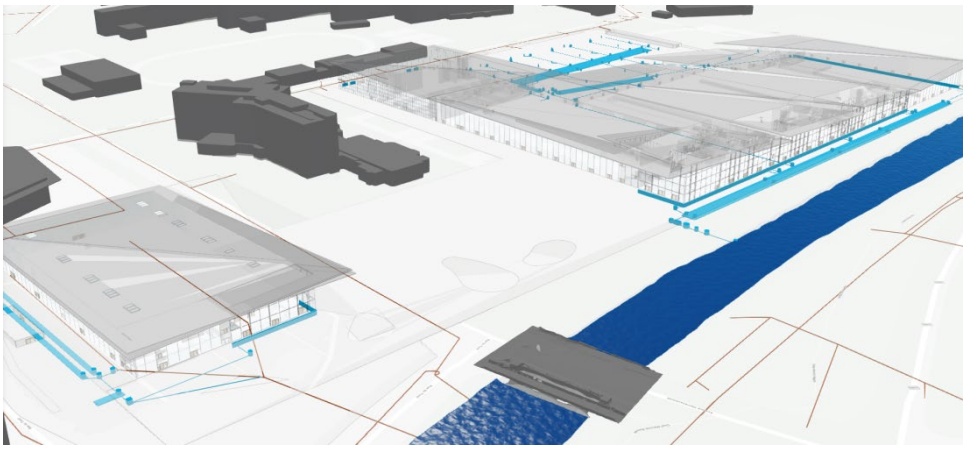

Figure 22 : rendu visuel de la scène 3

Les réseaux sont transformés en linéaires 3D et placés en sous-sol (décalage constant par rapport au sol et non pas de valeur Z). Leurs diamètres sont calculés à partir du champ correspondant (au minimum 20cm pour rester visible). Les extrusions négatives des équipements ont été déterminées de telle sorte que les volumes intersectent les linéaires 3D, donnant ainsi une représentation continue des réseaux. Les profondeurs d'extrusion et de décalage en sous-sol ont été déterminées selon l'organisation-type des réseaux souterrains (voir Figure 13).

6.5.4. Scène 4 (exploitation - gestion)

La dernière scène a pour but d'assister l'exploitant du PEX dans la gestion du bâtiment. Les enjeux lors de cette phase sont par exemple de garantir la sécurité des visiteurs et la fluidité des accès lors des périodes de forte affluence. Cette scène offre également une simulation de rendu visuel du bâtiment dans un environnement photoréaliste et peut donc servir de support de communication pour la maîtrise d'ouvrage.

Nous faisons appel à trois flux de données dans cette scène:

- les conditions de circulation issues du *Living Atlas*, en quasi temps réel
- les concentrations moyenne de NOx et de PM10 en 2018 : flux WMS de AtMO Grand Est

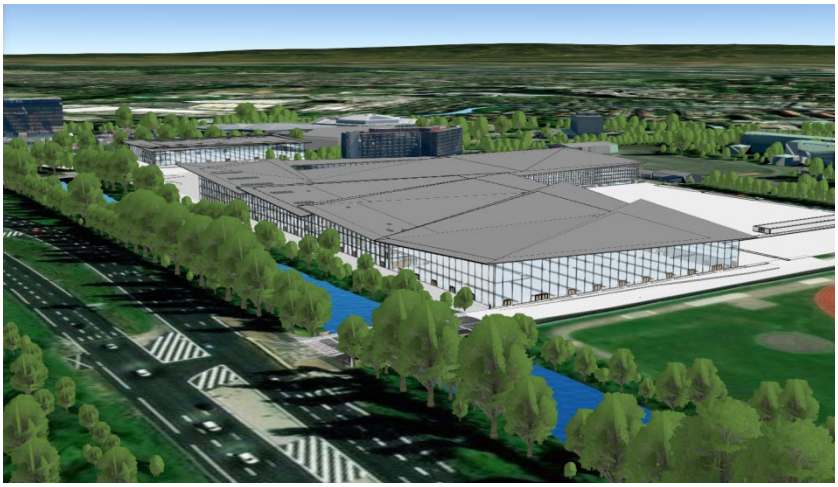

Figure 23 : rendu visuel de la scène 4

Les réseaux de voirie ainsi que la donnée du trafic sont drapés sur le MNT, tandis que la qualité de l'air est affichée en décalage uniforme par rapport au MNT. Quant à la sécurité incendie, les espaces d'attentes sont représentés par des volumes et les points d'accès pompiers sont transformés en sphère afin d'apparaître à travers les façades externes.

7. Développement de l'application web

L'ultime étape est la diffusion de la maquette intégrée auprès de l'équipe de maîtrise d'œuvre. Bien que les scènes soient directement consultables sur la plateforme d'ESRI, il est préférable de les intégrer dans une application en ligne afin de faciliter leur diffusion. Afin de faire un choix informé quant au moyen de diffusion, nous avons passé en revue la panoplie d'outils de création d'applications sur *ArcGIS Online* :

- ArcGIS Configurable Apps
- ArcGIS Web Appbuilder
- ArcGIS Experience Builder
- ArcGIS StoryMap
- ArcGIS API for JavaScript

La solution recherchée doit répondre à deux exigences : présenter les quatres scènes dans une interface unique et offrir suffisamment de possibilités d'interaction. *ArcGIS StoryMap* a donc rapidement été retenu pour sa flexibilité. En effet, seul *Experience Builder* et *Story Map* permettent de regrouper plusieurs scènes ou cartes. Le premier est cependant insuffisant car il n'intègre que des scènes (ou cartes) tandis que le second peut intégrer n'importe quel contenu web : des scènes, des cartes, mais aussi d'autres applications *ArcGIS* ou n'importe quel contenu HTML hébergé en externe.

Afin de trancher la question du contenu à inclure dans la StoryMap (des *Scenes*, des *WebApps*, ou une application personnalisée), une matrice comparant les widgets disponibles par solution a été réalisée. Les interactions recherchées avec la maquette sont celles qui découlent de son élaboration conceptuelle (voir section 5.2).

Tableau 14 : comparaison des widgets disponibles par produit ESRI

Interaction recherchée	**Fonctionnalité**	**Scene dans une StoryMap**	**Experience Builder**	**Web AppBuilder**	**Configurable Apps**	**API JavaScript**
Annotation	Draw, Editor, Attachments					
Requêter les informations	Pop-up					
Gestion des ombres	Daylight					
Intervisibilité	LineOfSight					
Filtrer les enjeux à afficher	LayerList					
Filtrer par étape de construction	BuildingExplorer					
Filtrer par niveau (*wireframe* / *x-ray*)	BuildingExplorer					
Mise en transparence d'un calque	Slice					
Requêtage topologique	Query					

Prise de mesure	Measure (line, area)					
Ajouter des flux	WMS Layer, Add data			2D		

Il ressort de cette matrice que les solutions « clés en main » d'ESRI pour créer des applications sans écrire du code ne nous permettent pas, à la date de notre évaluation, de développer une solution suffisamment approfondie. Nous nous sommes donc tournés vers l'API JavaScript.

7.1. Structure du programme

Comme la plupart des applications web, notre programme se compose de :

- un document HTML : avec les conteneurs pour la scène, les widgets et l'en-tête (en bootstrap). L'en-tête contient aussi les liens vers les fichiers .html des trois autres scènes
- une feuille de style CSS : pour paramétrer le texte, les icônes et les classes *esri*
- le script JS qui requête la scène d'*ArcGIS Online* et l'enrichit de widgets personnalisés (la scène devra au préalable avoir le niveau de partage « public »).

7.1.1. Le code JavaScript

L'API ArcGIS est construite avec la librairie *dojo*, qui permet une programmation asynchrone de l'application web. Les instructions JavaScript sont toutes écrites à l'intérieur de la fonction *dojo* "require", qui charge les classes de l'API ArcGIS dans notre application pendant que le reste du script s'exécute et que la scène 3D s'affiche dans le navigateur.

L'affichage est déclenché par les deux premières variables du script :

- Une première constante « webscene » qui instancie une classe *WebScene* : en l'occurence la Scène 3D créée sur *ArcGIS Online* et identifiée par sa clé sur le portail (paramètre : « id »).
- Une seconde constante « view » qui instancie une classe *SceneView* portant notre « webscene » à l'intérieur du conteneur HTML « viewDiv ».

Le reste du code sont les instanciations des widgets et leur ajout à notre objet « view ».

7.1.2. Liste des widgets

Ci-après la liste des widgets et la description de leurs fonctionnalités. Pour plus de détails, voir les commentaires du code disponible en inspectant la page de la première maquette.

Tableau 15 : liste des widgets utilisés

Widget	A partir	Description	Classes instanciées
Filtrage par niveau (*Building Filter*)	Ligne 56	Applique un filtre aux niveaux inférieurs à l'étage sélectionné. Le rendu du filtre peut être « rayon-x » ou « fil de fer ». Le filtre est désactivé par défaut et s'exécute lorsque le sélecteur d'étage est déplacé. L'appel à la fonction *view.when* permet de charger le reste de la page pendant que le	*Slider* *BuildingFilter* *Expand*

Widget	A partir	Description	Classes instanciées
		filtre de bâtiment attend la création du *view* pour être lancé.	
Liste de couches (Layer list)	Ligne 181	Liste des couches disponibles dans la scène. Permet de les afficher ou de les masquer.	*LayerList*
Coupe transversale (*Slice*)	Ligne 201	Génère un plan qui va trancher la scène et ne laisser apparaître les objets que dans un sens.	*Slice*
Ligne de vue (Line of Sight)	Ligne 223	Permet de tracer une ligne de vue pour déterminer si un point est visible d'un observateur.	*LineOfSight* *Graphic* *Expand*
Lumière du jour et ombre (*Daylight*)	Ligne 286	Simule l'ensoleillement de la scène en fonction de la date et de l'heure choisie. Offre une option d'activation / désactivation des ombres.	*Daylight* *Expand*
Mesure de superficie / longueur (*Measure*)	Ligne 307	En fonction du bouton cliqué (superficie ou longueur), instancie le widget de mesure 3D correspondant.	*DirectLineMeasurement3D* *AreaMeasurement3D*
Sélecteur de fond de plan (*Basemap toggle*)	Ligne 408	Permet d'alterner entre *nextBasemap* et la *basemap* de la scène (satellite ou gris léger).	*BasemapToggle*
Légende (*Legend*)	Ligne 415	Permet d'ouvrir une fenêtre avec la légende de la scène	*Legend* *Expand*

De la liste des fonctionnalités initiales (voir Tableau 14), cinq n'ont finalement pas été intégrées dans l'application :

- les annotations : toutes les solutions JavaScript envisagées sont des éditions d'entités (*Attachments* ou *Editor*), qui nécessitent d'avoir une couche modifiable sur le portail. Ces solutions sont plus complexes que ce qui est initialement recherché : pouvoir placer des étiquettes de commentaires sur la scène. Mais cette fonctionnalité pourra être ajoutée dans une version « opérationnelle » de l'application.
- le filtrage par phase de construction : l'application aurait dû inclure un explorateur de bâtiment contenant un sélecteur d'étage et de phase de construction. Ce dernier filtre est cependant inutile car toutes les entités de notre maquette sont à la même phase.
- angle de caméra : l'API JS n'offre pas de widgets dédiés permettant de représenter les champs de vision de caméras de surveillance par exemple.
- requêtage topologique : pour sélectionner les entités sur la base de leurs relations topologiques avec la maquette BIM. Cette fonctionnalité est très intéressante mais trop complexe à mettre en place dans le temps imparti.
- flux de données : pas de widgets « clés en main » dans l'API pour ajouter des flux à partir d'URL, et cette fonctionnalité n'est pas jugée essentielle.

7.2. Hébergement du programme

La plateforme *ArcGIS Online* ne permet pas d'héberger du code, mais seulement des applications réalisées avec les outils en ligne. Des applications externes peuvent par contre être référencées dans le contenu de la plateforme. Deux alternatives s'offrent donc à nous : héberger le code sur les serveurs d'OTE ou trouver un hébergeur sur le web. La première option a été rapidement écartée puisque les certificats SSL des serveurs n'étant pas à jour, l'ouverture de l'application sur la plateforme *ArcGIS Online* aurait été compromise.

L'hébergement choisi pour notre programme est le site web *Glitch* qui offre un environnement de développement intégré (IDE) et garde en ligne les applications créées dans l'IDE. *Glitch* génère aussi des liens de partage. Quatre applications ont donc été créées à partir du code source, une pour chaque scène de notre portail. Le lien de la première application a été ajouté à la *StoryMap* : dans « ajouter un bloc de contenu », catégorie « intégration ». L'en-tête de la maquette permet ensuite de passer d'une scène à l'autre.

7.3. Livrable

Le livrable de notre étude est une *StoryMap* contenant l'application web construite autour de nos quatre scènes BIM-SIG intégrées. Un texte explicatif et un guide d'utilisation précèdent la maquette. Des photos du site de construction du PEX sont également consultables.

Il est possible d'accéder à la *StoryMap* via ce lien :
https://storymaps.arcgis.com/stories/ff7a76da14ce4c90b402766546fc2200

Figure 24 : aperçu de la StoryMap

Grâce à cette application, les concepteurs BIM peuvent en quelques clics visualiser les enjeux physiques et réglementaires en lien avec le projet. Ils peuvent également réaliser des analyses simples grâce notamment aux outils de mesure et de filtrage de l'information disponibles dans le visualiseur. Si un point particulier est détecté et une analyse plus

poussée nécessaire, ils peuvent récupérer l'information géographique concernée sur le portail de l'entreprise et la lire dans leur logiciel de conception 3D. Cela présuppose cependant que les ingénieurs BIM travaillent dans une maquette correctement géoréférencée afin que les données SIG soient localisées au bon endroit.

8. Conclusion et perspectives

Ce projet a tout d'abord permis de dresser un inventaire des enjeux et des données géographiques d'intérêt pour l'intégration d'une maquette numérique de bâtiment dans un SIG. Ces enjeux concernent principalement les prescriptions d'urbanisme, de prévention des risques, de protection environnementale et les réseaux existants. Notre étude propose aussi d'organiser les enjeux selon le cycle de vie du bâtiment, regroupant les calques BIM et les couches SIG complémentaires afin d'avoir une maquette aux plus proches des besoins des utilisateurs à chaque étape de la conception. Elle nous a aussi permis de tester et valider des chaînes de traitements des données, afin de les préparer de la manière la moins chronophage possible et de les optimiser pour réduire leur poids.

Les maquettes intégrées ont également été l'occasion d'explorer les possibilités de rendu visuel 3D. Les principaux avantages de la 3D sont :

- dans le cas des emprises (prescriptions réglementaires, zones de risque) les extrusions en hauteur accentuent la visibilité des enjeux et matérialisent des intersections avec le volume du bâtiment
- dans le cas des réseaux, les extrusions au sous-sol leur donnent un rendu plus réaliste et permettent de les différencier par profondeur
- pour les interpolations de nappe, l'emploi de hauteurs absolues permet de visualiser l'emplacement de la limite d'eau par rapport au sol ainsi que les zones de débordement

Enfin, nous avons pu évaluer les possibilités de diffusion de la maquette. Il en ressort que le meilleur compromis entre une communication claire, une richesse d'interaction et une simplicité de mise en oeuvre est un mélange d'outils:

- le *SceneViewer* d'*ArcGIS Online* pour créer facilement les scènes
- l'*ArcGIS API for JavaScript* pour les enrichir de fonctionnalités d'interaction
- la *StoryMap* pour les insérer dans un support de communication intégré, efficace et multimédia

L'enjeu de ce projet-pilote a été d'évaluer la faisabilité d'une intégration BIM – SIG non seulement sur le plan technique, en évaluant les solutions logicielles utilisés chez OTE, que sur le plan collaboratif, en évaluant ses avantages pour la communication entre les services SIG, environnement et urbanisme, et les métiers de la conception technique et de la maîtrise d'œuvre.

Une généralisation de la pratique permettrait sans doute de développer des plus-values métier :

- Les cartographes acquièrent un savoir-faire autour du traitement de la donnée 3D qui est une discipline encore jeune dans les SIG
- La cartographie est exploitée à son plein potentiel car tout au long de la chaîne de traitement, l'information n'a fait que croître. D'une part, parce que le BIM n'a pas besoin d'être converti en format intermédiaire 3D (OBJ par exemple) ou 2D (DWG) et donc aucune information n'est perdue. D'autre part, les données spatiales sont

enrichies d'une dimension Z afin de pouvoir être lue dans la même maquette que le BIM.

- Grâce à l'application consultable en ligne, les ingénieurs BIM gardent un oeil sur les facteurs environnementaux tout au long du projet. En standardisant ou en scriptant le *workflow* d'import du BIM, une modification du modèle *Revit* est rapidement transposable à la maquette en ligne, de sorte que les conséquences de ces modifications sur l'environnement sont visibles rapidement.
- Les ingénieurs BIM disposent d'un inventaire de couches SIG qu'ils peuvent récupérer en ligne et charger dans leur projet. Ils n'ont ainsi plus besoin de demander des plans aux cartographes et gagnent en autonomie.
- Bien que cela n'ait pas été fait pour ce projet, la maquette intégrée peut-être un outil d'aide à la décision pour comparer l'impact de deux variantes d'un même bâtiment.
- Et surtout : la maquette intégrée permet de s'assurer que toutes les parties prenantes d'un projet BTP (métiers de la maîtrise d'oeuvre, maître d'ouvrage, environnementaliste) parlent un même langage, échangent sur la base d'un support visuel commun.

On relèvera une limite au projet : l'utilisation de dépôts intermédiaires de données sur *ArcGIS Online*. Les scènes en ligne devraient idéalement requêter les couches géographiques depuis une BD serveur et la maquette BIM directement depuis son fichier *Revit*. La duplication des données crée du travail de mise à jour de la maquette et est source d'erreur (mauvaises versions par exemple). Une piste notable d'amélioration serait donc d'automatiser la mise en ligne voire de synchroniser les classes d'entités locales avec les couches web, et de scripter la création et la mise en ligne du modèle BIM à partir des jeux *MultiPatch*.

A mesure que l'intégration BIM-SIG devient techniquement plus facile à réaliser, il faut garder à l'esprit que la finalité de la maquette intégrée n'est pas de créer une nouvelle méthode de travail hybride entre architecture et cartographie, ou de se substituer aux outils propres à chaque métier, mais de proposer une plate-forme d'échange d'information. Nous touchons là le coeur de la complémentarité entre BIM et SIG : mettre en commun les données qui peuvent l'être afin de créer un medium de communication exploitable par les deux pôles métier. Au lieu de s'échanger une série de plan en format PDF et papier, les cartographes et ingénieurs communiquent leurs résultats en alimentant les scènes 3D en ligne. Grâce à des outils comme la *StoryMap* qui est un support de partage très fonctionnel, la communication autour du projet peut même être étendue au grand public.

L'intégration BIM – SIG est donc un vecteur de transition numérique dans les métiers de l'ingénierie du bâtiment qui a l'avantage de finalement très peu changer les habitudes de travail puisque chaque participant continue d'utiliser ses méthodes, logiciels et formats habituels (DWG, RVT, SHP, etc...). La maquette constitue simplement un pont entre les deux disciplines.

La mise en contexte géographique est une problématique universelle à tout projet d'aménagement ou de construction. Les enjeux à considérer varient selon le lieu mais la démarche d'intégration avec le SIG est applicable à tous les BIM. L'intégration BIM – SIG offre de nouvelles potentialités de prise en compte des facteurs environnementaux en leur donnant plus de visibilité tout au long du projet.

9. Bibliographie

aplicit. *Convergence BIM-SIG.* 2020.
https://www.aplicit.com/convergence-bim-sig/

ANDERSEN Windows & Doors. *The evolution of BIM and BIM adoption*. 2020
https://www.andersenwindows.com/for-professionals/pro-views/bim-evolution/

arcOrama. *A propos de convergence BIM-SIG*. 2019
https://www.arcorama.fr/2019/04/a-propos-de-convergence-bim-sig.html

Autodesk. *BIM et SIG : l'alliance qui transformera la conception et la construction d'infrastructures*. 2020.
https://www.autodesk.fr/redshift/integration-sig-bim/

BIM & BTP. *Le BIM en France*. 2020.
https://bimbtp.com/decouvrir-le-bim/

buildingSMART France. *Notions clés du BIM*. 2019.
https://www.buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/definition-notions-bim/

CNIG. *MANDAT DU GROUPE DE TRAVAIL « GEOSTANDARD NUMERIQUE 3D - au service des villes et des territoires intelligents et durables»*. La Défense, 2017. http://cnig.gouv.fr/page_id=17535

CNIG. « Prescriptions nationales pour la dématérialisation des documents d'urbanisme ». *Standard CNIG PLU*. (Paris, Novembre 2019), v2017c.

Devys, Emmanuel et Gilles Gesquière. « Interopérabilité et intégration des données et modèles urbains : standards, normes et tendances pour les SIG », in *Modélisation urbaine : de la représentation au projet.* (Paris, Commissariat Général au Développement Durable, 2012), p. 92-105.

EuroMétropole Strasbourg. *Construction du nouveau Parc des Expositions de Strasbourg. Concertation préalable du 9 août au 31 août 2018.* Strasbourg, 2018.

EuroMétropole Strasbourg. *Note comparative PEX1/PEX2*. Strasbourg, 2019.

ESRI. *Géoréférencement 3D d'un modèle Revit*. 2020.
https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/help/data/revit/3d-georeferencing-revit-or-cad-data.htm

ESRI France. *BIM, MINND, MAQUETTE NUMERIQUE ET SIG*. 2019.

ESRI France. « BIM et SIG. Convergence et complémentarité ». *Livre blanc - 2019*. 2019.

ESRI France. *Convergence BIM & SIG*. 2020.
https://www.esrifrance.fr/bim.aspx

F3DF. *Format IFC – Qu'est-ce que c'est ?* 2020.
https://www.formation-3d-france.com/format-ifc/

Groupe OTE Ingénierie. *BIM – Maquette Numérique.* 2020.
https://www.ote-ingenierie.com/expertisescompetences-specifiques/bim-maquette-numerique/

Ma, Zhiliang et Yuan Ren. « Integrated Application of BIM and GIS: An Overview ». *Procedia Engineering*: vol. 196 (Juin 2017), p. 1072-1079.

Matejka, Petr et Ales Tomek. « Ontology of BIM in a Construction Project Life Cycle ». *Procedia Engineering*: vol. 196 (Juin 2017), p. 1080-1087.

MINnD. *Qu'est-ce que MINnD ?* 2019.
http://www.minnd.fr/le-projet-minnd/quest-ce-que-minnd/

Objectif BIM. *IFC, Industry Foundation Classes, le format IFC*. 2019.
http://www.objectif-bim.com/index.php/openbim/format-ifc

Open Geospatial Consortium. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. 2012.

Oehrli, Pascal et Laurent Niggeler. *Les enjeux de la convergence SIG/BIM et applications potentielles pour l'Etat de Genève*. République et Canton de Genève, 2017.

Ould Said, Celia. « Combinaison entre le BIM et le SIG ». *Veille Carto 2.0.* 2017.
https://veillecarto2-0.fr/2017/10/20/combinaison-entre-bim-sig/

RIB. *If BIM's a Mystery, Here's the History!.* 2017
https://www.rib-international.com/en/company/blog/if-bims-a-mystery-heres-the-history/#:~:text=Thus%2C%20Graphical%20Language%20for%20Interactive,and%20evaluation%20of%20structural%20design.

Roua, Yanni. « BIM et SIG : l'alliance pour le City Information Modelling (CIM) », in *BIM in Motion*. (Saint-Didier au Mont d'Or, 2018).
https://www.biminmotion.fr/blog/bim-et-sig-lalliance-pour-le-city-information-modeling-cim