



Sarra BENSAHA
Master 02

MEMOIRE encadré par:
François GUENA
Anne Tucher
Joaquim SILVESRTE

SOMMAIRE :

INTRODUCTION	03
Corpus	04
Objet de la recherche	05
Méthodologie de la recherche	05
Hypothèses	05
1. Panorama sur l'évolution de la conception des enveloppes architecturales	07
1.1. Le constat actuel des enveloppes architecturales.....	07
1.2. Les défis de la conception et la gestion des enveloppes architecturales.....	14
CONCLUSION	18
2. BIM, architectes et projet architectural.....	20
2.1. Qu'est-ce que le BIM ?.....	20
2.1.1. Définition	20
2.1.2. Maquette numérique	21
2.1.3. Travail collaboratif	22
2.1.4. Interopérabilité	23
2.2. Le BIM dans les agences d'architecture.....	24
2.2.1. Le BIM et la place de l'architecte	24
2.2.2. L'intégration du BIM dans les agences d'architecture en quelques chiffres.....	25
2.3. L'outil métier peut-il brider l'architecture ?.....	26
2.4. Standard et non standard	31
CONCLUSION	35
3. Etude de cas	36
3.1. Etude de cas N° 01 : le projet de Hangzhou	37
3.1.1. Présentation de l'agence	37
3.1.2. Présentation du projet	37
3.1.3. Processus et flux de travail	37
CONCLUSION	45
3.2. Etude de cas N° 01 : le projet de L'Aréna 92	47
3.2.1. Présentation du projet	47
3.2.2. Descriptif de l'ouvrage et objectif	48
3.2.3. Processus de conception et flux de travail.....	48
CONCLUSION	55

4. Expérimentation :	57
Introduction	57
4.1. Contexte et objectifs de l'expérimentation	57
4.2. Protocole et organisation de la maquette numérique	58
4.2.1. Protocole collaboratif	58
4.2.2. La géométrie et la qualité de la modélisation	58
4.3. Fonctionnement des échanges des fichiers numériques	59
4.3.1. Principes et flux de travail	59
4.3.2. Synchronisation et échanges des modèles 3D	60
4.4. Méthodes et processus de conception.....	61
4.4.1. Conception de la surface de référence	61
4.4.2. Conception des panneaux de façade	63
4.4.3. Conception des supports panneaux de façade	68
4.5. Synthèse.....	69
4.5.1. Les échanges et le partage des maquettes numériques 3D	69
4.5.2. BIM et la conception paramétrique	70
4.5.3. Le contrôle et la vérification des maquettes numériques 3D.....	71
CONCLUSION GENERALE.....	72
Bibliographie	74

INTRODUCTION :

Les avancées numériques et les progrès technologiques en ces dernières années ont radicalement transformé notre manière de communiquer, de travailler et de penser. Aussi, ils suscitent de nouvelles pratiques dans différents secteurs, notamment dans le secteur de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction en ayant ce besoin permanent de construire plus rapidement et plus durablement.

Pour l'architecte, l'outil numérique s'est avéré un moyen important dans la conception architecturale en lui offrant des nouvelles perspectives d'où « *la forme architecturale s'est libérée d'avantage, comme avec l'apparition d'Autocad qui a facilité l'utilisation des courbes et les formes fluides dans la conception du bâtiment* »¹. L'outil numérique permet au concepteur avant tout de visualiser et de manipuler des formes à géométries complexes plus facilement. Aussi, la conception architecturale connaît une réelle mutation ou des nouveaux concepts émergents en donnant naissance à des nouvelles créations architecturales et des nouvelles méthodes de s'organiser autour du projet.

Les enveloppes architecturales ont été souvent considérées comme l'une des parties les plus importantes et les mieux considérées dans le projet architectural, et cela depuis très longtemps.

Avec l'avènement du numérique, les enveloppes architecturales se libèrent davantage en matière de forme, des matériaux et des motifs. Elles représentent désormais une forte signification d'élégance, de grandeur et deviennent un symbole important avec une caractéristique exceptionnelle de la ville contemporaine.

La mise en œuvre de ces enveloppes nécessite tout de même une certaine organisation avec des flux de travail fortement liés à des outils numériques, et cela à travers tout l'ensemble de la chaîne de conception, de fabrication et de mise en place sur chantier.

Cette influence du numérique, dans le secteur du bâtiment, a fait apparaître en ces dernières années le BIM, qui devient un sujet fortement discuté dans la pratique architecturale, voir même imposé par certains maîtres d'ouvrage. Le BIM s'agit d'un processus de travail collaboratif autour des maquettes numériques tout au long du cycle de vie du projet, depuis la conception jusqu'à l'exploitation du projet.

Ce processus devient très utilisé dans de nombreux pays, comme les Etats-Unis, le Royaume-Uni, Singapour, la Corée du Sud et le Japon. Ces pays ont longtemps travaillé avec ce processus, ils ont même publié des normes de travail autour du BIM et ont adapté leurs phases de conceptions à cela.

En France, le processus BIM a créé des troubles dans le secteur du bâtiment. Pour certains intervenants du bâtiment, ce processus est un obstacle pour la profession et limite la créativité. De plus, ils trouvent que ce processus est purement commercial, développé uniquement pour l'intérêt des éditeurs de logiciel et les grandes agences, et transforme les architectes en techniciens d'informatique.

¹ [MATHIEU BARLET, l'influence du BIM sur l'architecture. Liens : <https://msbim.estp.fr/?p=2095>](https://msbim.estp.fr/?p=2095)

D'autre part, certains architectes qui adoptent ce processus dès les premières phases de conception trouvent que le BIM ne freine en aucun cas leur créativité, et que cela permet plutôt de réaliser fidèlement la conception architecturale grâce aux liens possibles entre la conception et la fabrication numérique. Le BIM a aussi joué un rôle important dans la conception et la réalisation de nombreux projets d'enveloppes architecturales complexes qui nécessitaient une certaine rigueur, comme dans le projet de la fondation Louis Vuitton, le projet de la fondation Luma de F.Gehry et le projet de l'Aréna 92 de C.D.Portzamparc.

Les enveloppes architecturales, notamment celles d'aujourd'hui, pensées à l'aide des outils numériques puissants, deviennent un sujet central dans l'industrie du bâtiment. Les éléments composants ces enveloppes deviennent souvent préfabriqués, en conséquence, leur mise œuvre se retrouve fortement et souvent attachée à l'industrie de la fabrication avec des machines numériques, ce qui fait que cette partie importante du projet à mon sens est la branche la plus interdisciplinaire dans le secteur du bâtiment.

Du point de vue conception, fabrication et montage des enveloppes architecturales, les architectes peuvent se servir des outils numériques afin de concevoir et surtout assurer la communication de leur conception aux autres intervenants et l'évolution de leur conception d'une phase à une autre dont le processus BIM pourrait y apporter une valeur ajoutée.

En cela, l'introduction du BIM dans la pratique architecturale peut induire de nombreux changements dans la production architecturale, notamment les enveloppes architecturales, d'où notre problématique de départ qui consiste à comprendre et à vérifier ce qui suit:

« *Quelle est l'influence du BIM sur la conception de l'enveloppe architecturale ?* ».

CORPUS :

Cette recherche consiste à comprendre et à vérifier l'influence du BIM sur la conception des enveloppes architecturales. Notre recherche va s'appuyer sur l'analyse des références, des cas d'études de projets construits et *un prototype*² d'expérimentation développé dans le cadre de ce mémoire.

OBJECT DE LA RECHERCHE :

Ce mémoire analyse principalement l'influence du BIM sur la conception des enveloppes architecturales. Aussi, il traite les mécanismes et les défis du BIM et donnera les perspectives des changements technologiques apportés par le processus BIM aux enveloppes architecturales.

² Prototype d'une enveloppe architecturale développé avec un processus BIM par l'auteur de ce mémoire.

METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE :

La méthode de recherche consiste à exposer dans un premier temps, un panorama sur l'évolution de la conception des enveloppes architecturales par un constat actuel des enveloppes architecturales et les défis des concepteurs et leur organisation autour des enveloppes architecturales.

Dans la deuxième partie, on présente les pratiques BIM, leurs caractéristiques et leurs retombées sur les acteurs du bâtiment. On évoque aussi la place de l'architecte avec l'avènement du BIM et l'influence de ce dernier sur l'architecture en se référant à quelques témoignages et articles publiés par des architectes.

En outre, la troisième partie porte sur l'analyse de deux cas d'étude où le BIM a été appliqué dans la conception des enveloppes architecturales.

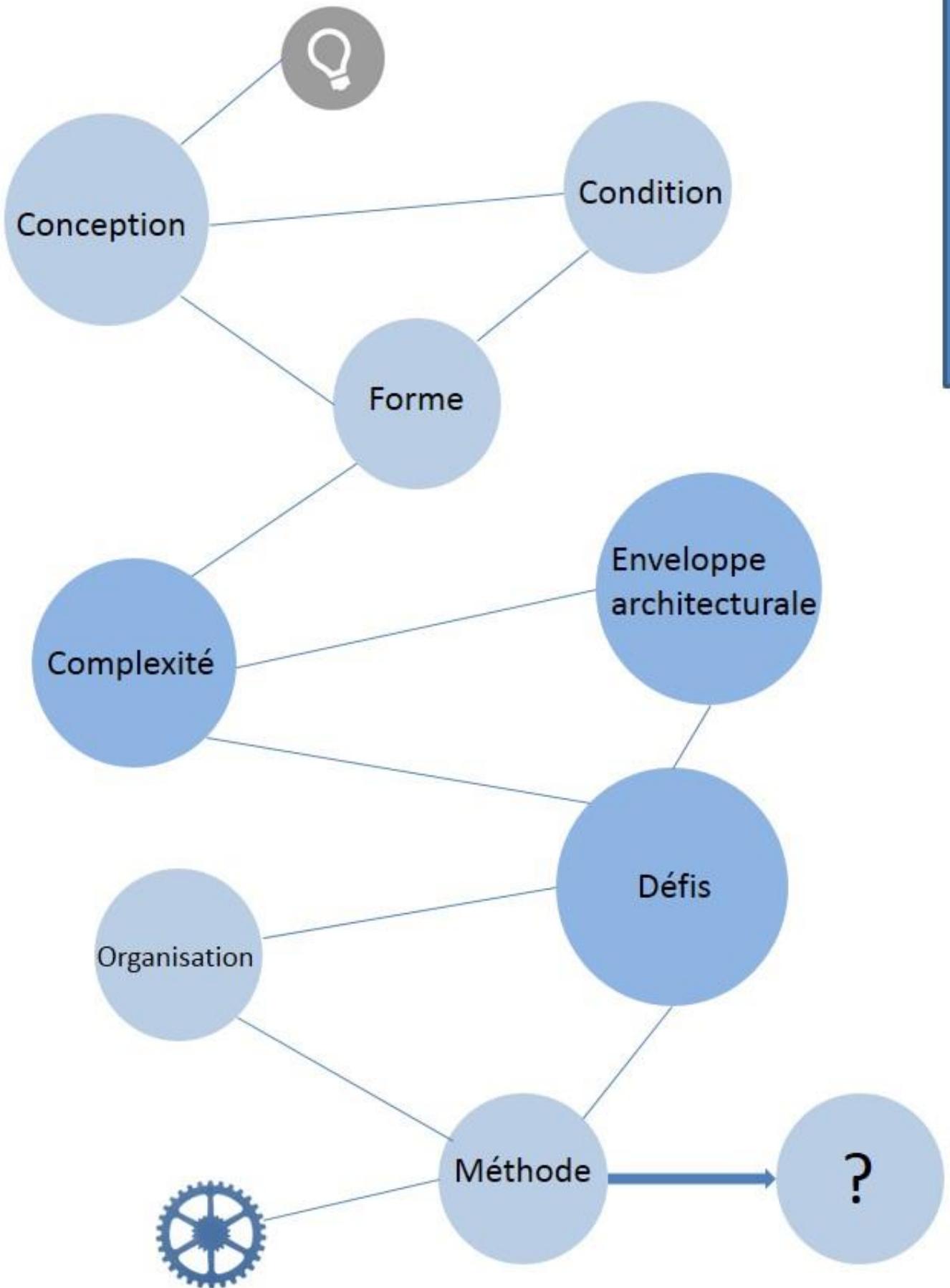
Ensuite, dans la dernière partie, on procède par une analyse d'une expérimentation d'enveloppe architecturale en modèle 3D BIM développée dans le cadre de cette recherche afin d'en tirer les mécanismes.

Enfin, à partir des deux parties précédentes un flux de travail sera mis en place, avec comme but de vérifier notre hypothèse de départ.

HYPOTHESE :

Le processus BIM par son caractère de documentation et échange des données assure un bon déroulement de toute la chaîne de production des enveloppes architecturales, et ce, depuis la conception jusqu'au montage

Le BIM n'influence pas sur la qualité architecturale car c'est un processus de gestion et une méthode de travail.



1. Panorama sur l'évolution de la conception et l'industrie des enveloppes architecturales :

1.1. Le constat actuel des enveloppes architecturales :

La pratique architecturale est fortement influencée par l'économie, la mondialisation et les innovations technologiques. Elle a connu une mutation profonde durant ces dernières décennies, suscitant des projets architecturaux à la fois libres et complexes avec des processus de conception aussi complexes et pointus. En cela, les outils de conception et de fabrication, utilisés depuis longtemps dans le domaine de l'industrie deviennent indispensables dans la conception et la production architecturale.

L'enveloppe du bâtiment est l'élément principal dans laquelle la conception architecturale peut refléter les avancées technologiques dans le monde de l'architecture. Certains concepts sont considérés comme précurseurs de la complexité formelle des expériences déconstructivistes. Ce courant illustre la volonté de dépasser la rigidité, le symbolisme et la simplicité des formes. La forme architecturale est orientée vers la complexité, elle est traduite par des plans « chaotiquement »³ disposés dans l'espace des angles aigus et des enveloppes complexes (Figure 01).

Par ce procédé de décomposition, les architectes expriment dans leurs bâtiments, les contradictions, reflétant les conflits de la ville, de la société et de la culture de cette époque, « *Un des principes fondamentales de la déconstruction est qu'« elle veut inventer l'impossible », les formes sont pensées de façon à révéler et non dissimuler, elles ont la capacité de déranger la façon habituelle de percevoir les configurations spatiales.* »⁴



Figure01: la façade du musée Royal d'Ontario

³ Chiara Silvestri, *PERCEPTION ET CONCEPTION DE L'ARCHITECTURE NON STANDARD* (thèse de doctorat), soutenu en 2013, université de Montpellier II.

⁴ Cours d'Histoire de l'Art des étudiants de 2e année de l'Ecole de design Nantes Atlantique, option Transport. Publié en 2017. Site : <https://histoiredelart2.wordpress.com/2017/01/02/le-deconstructivisme-appelle-aussi-la-nouvelle-architecture-moderne/>

Le déconstructiviste est connu par des formes à caractère fluide, des formes irrégulières, l'absence de la symétrie et une certaine fragmentation de l'enveloppe architecturale. Le but est de créer un mouvement dans la façade appelé par certains architectes « la façade dynamique » par l'impression qu'elle reflète. De nombreux architectes s'inscrivaient dans ce mouvement architectural, tout comme l'architecte Frank Ghery avec son musée Guggenheim de Bilbao (Figure 02 et 03). L'architecture de ce musée est en relation étroite avec le site dans lequel il a été implanté, il reflète une sorte de transition entre la ville et le fleuve.

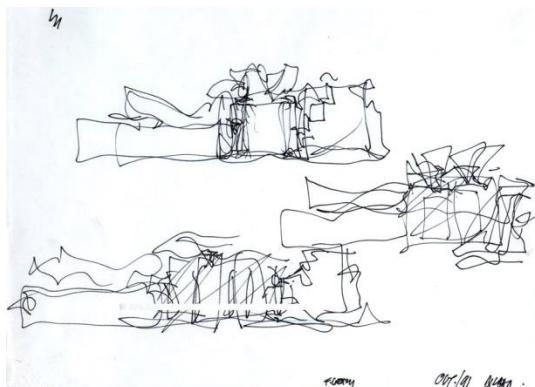


Figure02: croquis du musée de Guggenheim



Figure03: la Façade du musée de Guggenheim

Les outils numériques ont rendu possible, la création de ces formes qui, étaient inconcevables auparavant, avec plus de volonté de produire des enveloppes architecturales plus complexe et plus dynamique. L'outil devient désormais au service de la recherche et de l'innovation en architecture. Il n'est plus considéré comme un simple moyen de visualisation et de représentation, mais plutôt comme un outil d'analyse, d'optimisation et de recherche formelle avec comme possibilité d'associer des algorithmes par des langages de codages à la conception. De ce fait, l'architecte ne dessine plus mais il manipule des modèles paramétriques. Contrairement à la conception traditionnelle, la conception architecturale numérique est devenue une opération qui établit des relations entre différents paramètres, elle n'induit pas une évolution linéaire mais elle est susceptible d'établir de nouvelles relations et d'introduire de nouvelles données ou de les retirer. Le lien entre le bâtiment et son environnement se traduit par une recherche formelle plus expressive en intégrant des données réelles et précises de l'environnement dans les opérations de conception.

Aussi, les enveloppes architecturales d'aujourd'hui sont le résultat d'un processus de conception dite évolutif, c'est-à-dire elles sont issues de l'application d'un ensemble de règles génératives et d'un parcours évolutif, où la forme de l'enveloppe architecturale est définie ou qualifiée comme solution finale/ optimale.

Le musée de Louvre à Abu Dhabi, conçu par Jean Nouvel, a ouvert ses portes le 11 novembre 2017, il illustre parfaitement les avancées technologiques en terme de conception et de production architecturale. L'enveloppe architecturale est conçue d'une façon inverse par rapport au processus de conception habituelle. A partir de l'ambiance intérieure définie par l'architecte, la forme géométrique extérieure est générée, tout en apportant de l'ombre et réduisant la consommation énergétique. Le résultat est une forme de dentelle géométrique

(Figure 04) ; l’agencement complexe d’une trame répétée en plusieurs formes, tailles et angles créent une ambiance à l’intérieure sous forme d’une « Pluie de lumière » (Figure 05) à la fois protectrice et délicate, à la manière de claustrâts des moucharabiehs.



Figure04: Dentelle géométrique du musé de Love à Abu Dhabi

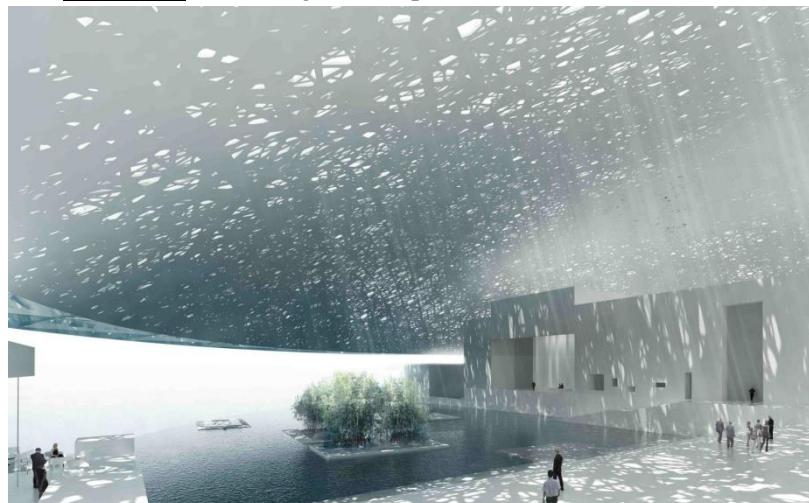


Figure05: Pluie de lumière au musé de Love à Abu Dhabi

L’architecte a formulé des conditions pour l’ambiance intérieure à partir desquels la forme a été générée comme c’est déjà mentionné auparavant. Ces conditions se résument en trois points ; une pluie de lumière, le confort, la variation des niveaux de lumière et les températures. « *C'est un microclimat qui est créé, en s'appuyant sur les sensations explorées maintes fois à travers la grande architecture arabe, qui est un jeu sur la maîtrise de la lumière et de la géométrie (...) une structure d'ombre, de cheminement et de découverte.* »⁵. Jean NOUVEL

⁵ AGENCE FRANCE MUSEUMS, *le projet architectural* [en ligne]. <http://www.agencefrancemuseums.fr/fr/le-louvre-abu-dhabi/le-projet-architectural/>

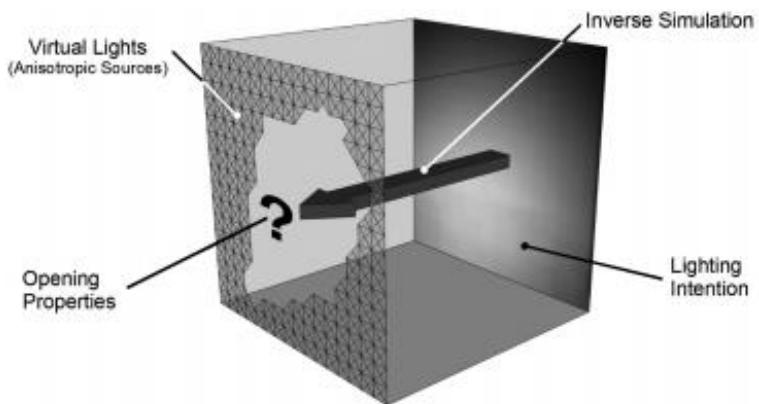


Figure 06⁶ : Schéma expliquant le concept du modèle d'éclairage inverse.

Source : VINCENT TOURRE, FRANCIS MIGUET, *A light-based parametric design model*.⁶

Le modèle d'éclairage inverse utilisé pour le projet comporte trois étapes. La première consiste à générer une source de lumière virtuelle, la seconde est l'évaluation des sources de lumière par rapport à l'intention du concepteur pour calculer l'influence de la lumière naturelle sur la surface intérieure et troisièmement établir un modèle de surface de filtrage comme un point de départ de la conception.

Le projet de Jean Nouvel, montre que le modèle d'éclairage inverse (Figure 06) est capable de définir les propriétés et les caractéristiques des ouvertures présentées sur l'enveloppe et peut-être une aide à la conception. Ce processus de conception basé sur l'éclairage peut être appliqué à d'autre phénomène.

La façade du parking de l'hôpital ESKENAZI conçu par l'architecte Rob Ley en 2014, s'inscrit dans un contexte différent par rapport à l'exemple précédent, l'effet que produisent les panneaux sur l'enveloppe du bâtiment offre aux observateurs, en fonction de leurs positions et leurs vitesses de déplacement, une expérience visuelle unique grâce aux 7000 panneaux métalliques installés sur la façade avec une stratégie de couleurs articulées est/ouest (Figure 08 et 09).



Figure 07 et 08 : les façades du parking de l'hôpital ESKENAZI

⁶ Source : VINCENT TOURRE, FRANCIS MIGUET, *A light-based parametric design model*. Page 791 [en ligne] http://cressound.grenoble.archi.fr/fichier_pdf/librairie_ambiance/a_light_based_parametric_design_model_tourre.pdf

Grace à l'outil numérique, une stratégie d'articulation des motifs et des arrêtes complexes a été développée (**Figure 09**). Des techniques de génération et de construction d'image bidimensionnelle ont été exploitées tout en prenant en compte les éléments tectoniques du bâtiment dans la conception et la fabrication. L'intention du départ était issue d'une idée de camouflage actif et dynamique afin de donner de la valeur à une structure de stationnement ordinaire. L'idée avait évolué au cours de la conception vers une approche qui dépasse l'échelle du bâtiment, en une œuvre d'art dynamique et active à l'échelle urbaine.

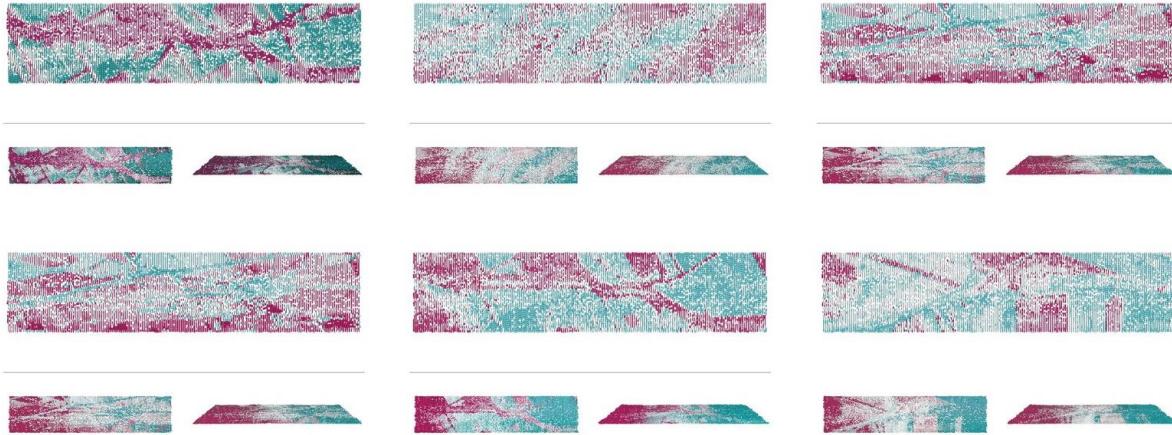


Figure 09: les façades du parking de l'hôpital Esknuzi

Le choix de couleurs, de taille et d'orientation des panneaux (**Figure 09**) créent un degré de variation de schémas produits sur la façade au fur et à mesure qu'on passe devant le projet.

L'enveloppe dynamique est définie autrement dans un autre projet connu pour son enveloppe adaptative, le projet est celui d'Al-Bahr Tower à Abu Dhabi, construit en 2012 par AEDAS Architecture (une agence d'architecture britannique), il illustre la réinterprétation contemporaine de la notion de Moucharabieh. L'équipe de conception a pu simuler le fonctionnement des composants de l'enveloppe en repense à l'exposition au soleil et l'analyse du rayonnement pendant les différents jours de l'année.



Figure10 : les tours d'Al-Bahr à Abu Dhabi

Le résultat final était un écran dynamique programmé avec un mouvement de fermeture et d'ouverture de 2000 panneaux. Les composants de l'enveloppe sont conçus sous forme de triangles, la forme géométrique de base est développée à partir d'un motif géométrique de l'art islamique. Les panneaux sont recouverts de fibre de verre et programmés pour rependre aux conditions optimales de l'énergie solaire et de la lumière.

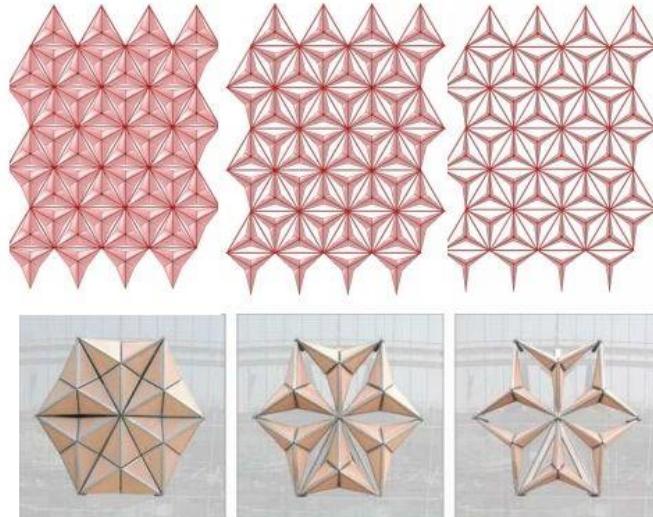


Figure 11 : le comportement des composants de l'enveloppe architecturale

Les outils de conception paramétrique étaient jumelés avec des logiciels de simulation thermique pour l'évaluation de la performance des variantes en termes d'exposition au rayonnement de la lumière naturelle. Un tel dispositif était nécessaire pour la régularisation thermique du bâtiment et rependre au besoin de l'occupant.

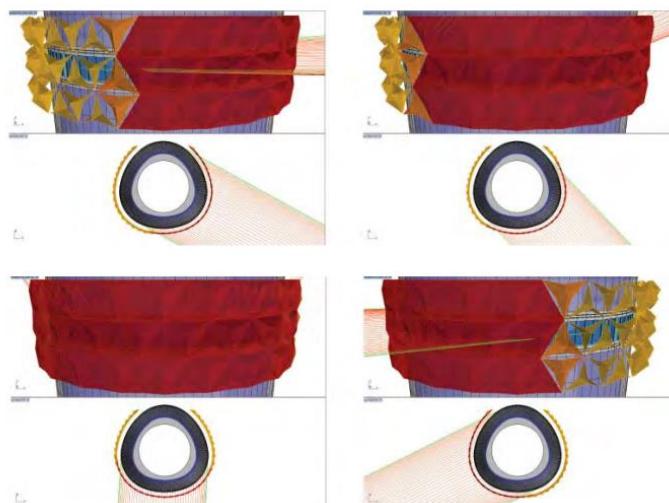


Figure 12 : les composants de l'enveloppe en fonction de l'exposition au soleil

Bryan Hamilton, directeur de l'agence d'architecture Aedas, trouve que "*Ce projet représente le mariage parfait de la technologie et du design. Non seulement les bâtiments sont beaux, mais ils sont tout à fait adaptés à leur environnement et favorables à leur environnement.*"⁷

⁷ <https://www.e-architect.co.uk/dubai/al-bahar-towers-abu-dhabi>

CONCLUSION :

L'avancée technologique a redéfini la conception des enveloppes architecturales dans la mesure où des données liées à l'environnement naturel, social et urbain puissent être intégrées directement dans les opérations de conception, en apportant de nouvelles formes et comportements sur les façades. Cette partie la plus interdisciplinaire du bâtiment n'est plus considérée seulement comme un élément séparateur entre les conditions d'intérieur et de l'extérieur, mais plutôt un organisme qui engage pleinement la totalité des systèmes d'ingénierie. Par conséquent, l'architecte et les autres intervenants sont appelés à affronter plusieurs défis afin d'assurer l'élaboration de ses enveloppes qui s'avèrent très complexes.

1.2. Les défis de la conception et la gestion des enveloppes architecturales :

Les enveloppes architecturales deviennent de plus en plus complexes par leur forme et leur composition et, parallèlement les réglementations techniques deviennent de plus en plus exigeantes, cela a mené les concepteurs à affronter tout un ensemble de processus (conception, construction, fabrication et installation) qui exige une certaine rigueur et précision.

La construction des bâtiments, notamment l'enveloppe architecturale a subi un gaspillage important en termes de production, selon des statistiques la valeur du gaspillage dans la réalisation des projets représentent 25% de l'investissement total.

La conception de l'enveloppe architecturale est considérée comme la partie la plus interdisciplinaire du bâtiment. Elle représente un véritable compromis entre efficacité et esthétique. La notion du confort, que ça soit thermique, visuel ou acoustique occupe une place primordiale dans la production des façades. Ces notions peuvent être conditionnées par certaines réglementations, elles peuvent parfois influencer sur la forme et les composants de la façade (formes, ouvertures, orientation).

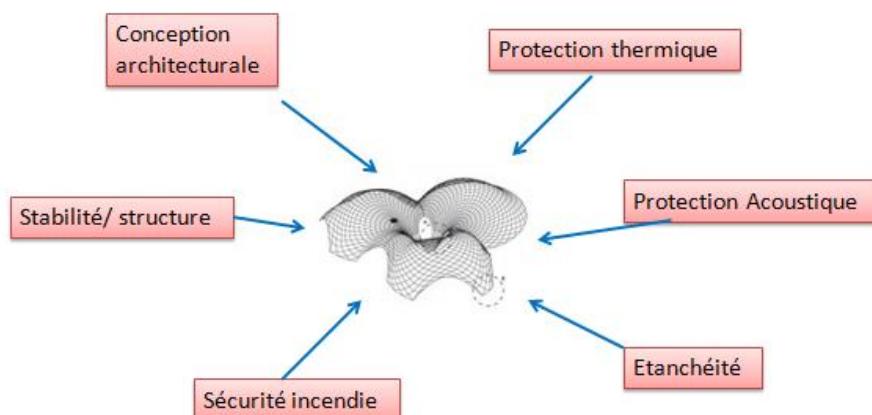


Figure 13 : les différents corps de métier qui participent à la conception de la façade.

Sources : l'auteur du mémoire (Sarra BENSAHA)

De plus, la puissance technologique permet de renseigner et de diffuser en temps réelle différents types de données (métrologique, statistique...etc.) aux différents concepteurs. Cette technologie nécessite une qualité de production envers les professionnels qui est sans cesse tiré vers le haut. Les besoins qui sont extrêmement variés, que ça soit de la part du concepteur, producteur ou les utilisateurs ont engendré l'émergence de nouvelles structures (BET métiers, FabLab, espace de coworking, entreprise...etc.), variées en tailles et en compétences. L'élaboration d'enveloppe architecturale nécessite une forte collaboration architectes, l'équipe de maîtrise d'œuvre et les entreprises, et cela dès les premières phases de conception de l'enveloppe architecturale. (Figure 13)

Les processus de conception de l'enveloppe architecturale sont actuellement caractérisés par une complexité organisationnelle, où les concepteurs sont amenés à affronter des défis technologiques et mécaniques imposés par la forme complexe. En outre, le système de travail, qui se caractérise par l'hyper-spécialisation, exige la participation et la collaboration étroite entre tous les intervenants, notamment la collaboration entre architecte et ingénieur structure. Contrairement à la méthode d'autre fois, où l'architecte était le seul concepteur du projet, il s'occupait de la forme et demandait à l'ingénieur d'assurer la stabilité et la résistance mécanique. Aujourd'hui, le processus de conception a pris de nouvelles dimensions, la recherche formelle se fait à deux ou à plusieurs concepteurs métiers afin d'obtenir une forme qui repend aux exigences esthétiques et mécaniques.

De nombreux projets sont le fruit de ce type de collaboration, notamment le projet d'Herzog et Demeuron ; le stade olympique de Pékin (Figure 14), la production de la forme était faite de telle sorte que l'entrelacement de la structure crée une surface unique.



Figure 14 : le stade olympique de Pékin

Les architectes avec la collaboration d'Arup Sport ont conçu une série de fermes pour soutenir le toit (l'exigence était de générer une forme la plus légère). Ensuite des motifs irréguliers de poutres (secondaires) entrecroisées ont été tissés, créant l'illusion d'une gigantesque bande élastique tendue pour maintenir le bâtiment. (Figure 14).

Ce processus permet d'émerger une autre caractéristique de la production des enveloppes architecturales et de transgresser des frontières établies autrefois entre l'aspect structurel et esthétique (architecturale). (Figure 15).

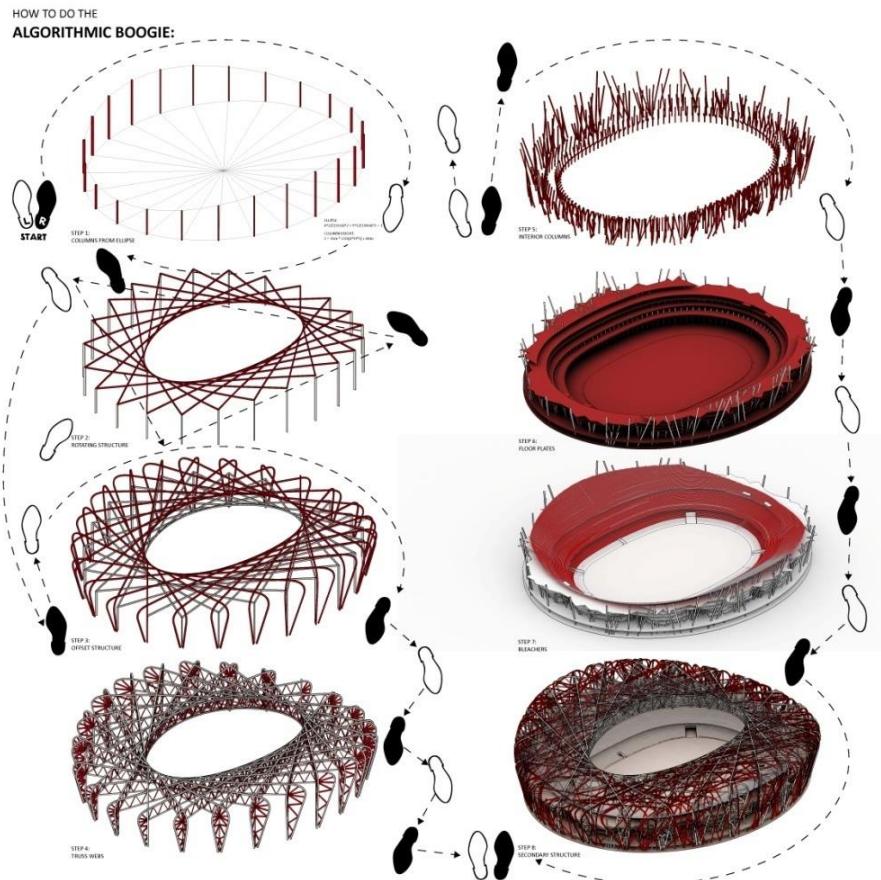


Figure15 : l'évolution de la conception du stade de Pékin.

L'efficacité de ce type de processus nécessite la compréhension et la mise en place d'un système de communication que toute l'équipe doit définir avant d'entamer chaque projet afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté et d'incompréhensions des actions dès les premières phases de conception (lors de la recherche formelle). Un défi qu'on doit relever très tôt pour la bonne gestion et l'élaboration du projet.

En comparant avec la fabrication ou la construction traditionnelle, les composants des enveloppes architecturales sont devenus « non standard ». Les panneaux ont un degré de personnalisation très élevée, qu'on peut distinguer non seulement dans différents projets mais aussi dans différentes parties du même projet. Avec l'apparition de nouvelles pratiques et de nouveaux matériaux, la fabrication et l'installation des panneaux devient de plus en plus complexe et nécessite une connexion transparente et des données détaillées. Dans le cas où le processus de fabrication et d'installation ne sont pas gérés convenablement, le positionnement des panneaux peut être confus et entraîne ainsi des retards et des gaspillages.

Le projet de Soumaya Museo au Mexico est un exemple qui exige la collaboration et la jonction parfaite entre conception, fabrication et installation. Il est conçu par l'architecte Fernando Romero en 2011, il le décrit comme une structure de style libre « trapèze en mouvement ».



Figure 16 : le musée de Soumaya au Mexico

L'enveloppe architecturale se compose de 16 000 panneaux en formes d'hexagones qui semblent flotter sur la surface, séparés seulement par quelques millimètres les uns aux autres.

Le trapèze en mouvement procède des courbures et des orientations variables à chaque point, ce qui a rendu la réalisation de la façade un grand défi. Il était nécessaire de définir avec précision l'orientation, la forme et la taille de chaque hexagone, (figure17).



Figure 17 : les différents hexagones de l'enveloppe. Source : Gehry tech

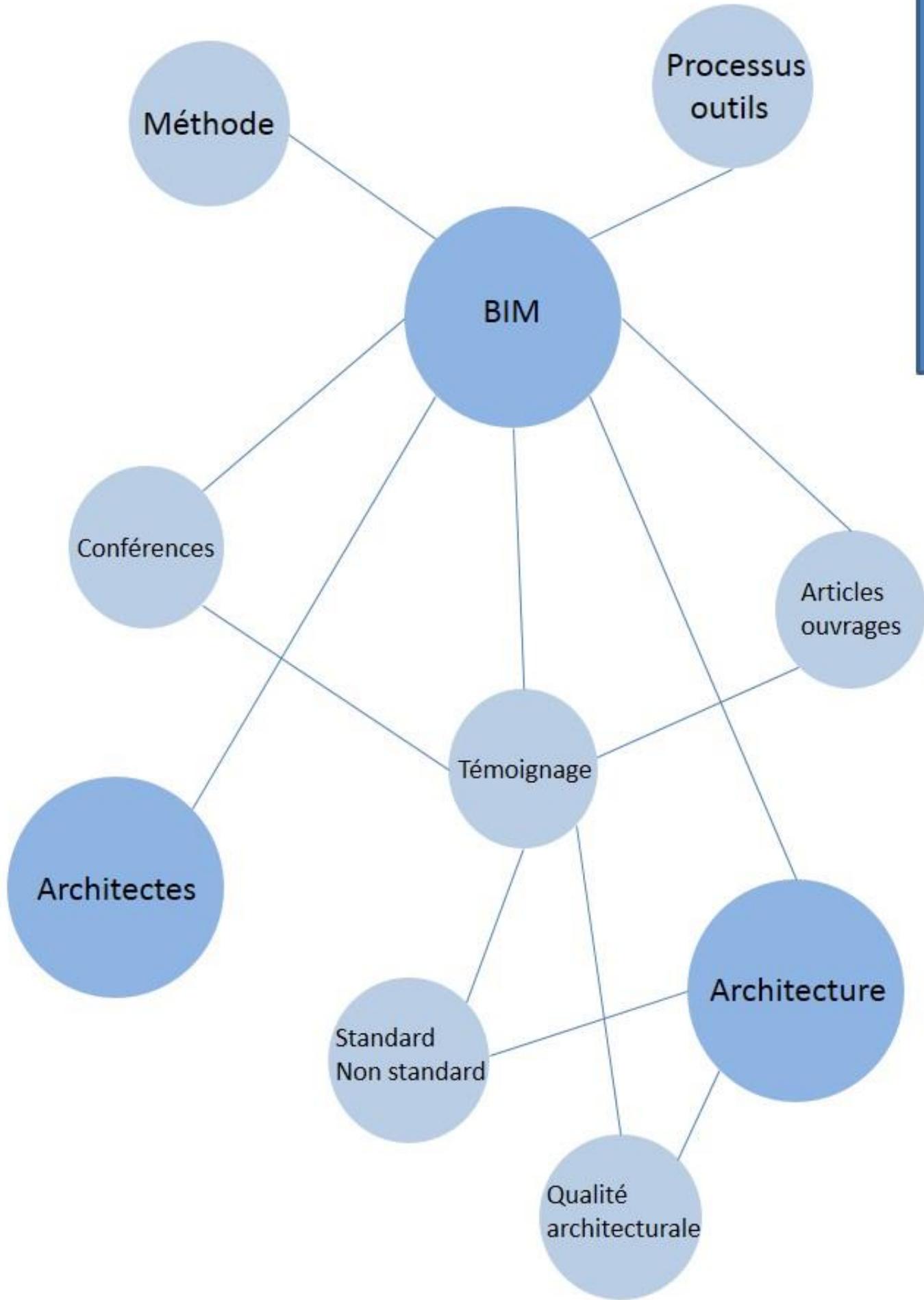
CONCLUSION :

La conception et la réalisation des enveloppes architecturales qui présentent une certaine complexité dans la forme et les composantes, obligent les concepteurs à affronter plusieurs défis, qui sont les suivants :

- Les règlementations qui deviennent de plus en plus exigeantes.
- Les premières phases de conception (recherche formelle) ne sont pas menées uniquement par l'architecte. Donc, cela nécessite la mise en place d'un flux de travail permettant la collaboration étroite entre plusieurs intervenants.
- Assurer la bonne gestion du projet dès la phase de conception.
- Processus de conception et de production sont étroitement liés.

Afin de mener à bien l'élaboration du projet, les concepteurs doivent mettre en place une méthode de travail qui permet la bonne gestion et le bon déroulement du processus de conception voir même la production et l'installation.

Dans le chapitre suivant on va évoquer un processus de gestion qui est selon certain utilisateur bénéfique et efficace pour la gestion de ce genre de projet.



2. BIM, architectes et projet architectural :

L'enveloppe architecturale, avec sa complexité en terme de conception et de composition nécessite un flux de travail spécifique et bien défini, elle fait appel aux différents intervenants qui travaillent en collaboration et veillent à ce que l'élaboration du projet se fasse dans les règles de l'art.

2.1. Qu'est-ce que le BIM :

Avec la révolution numérique, une nouvelle pratique dite BIM (Building information Modeling) est émergée dans le secteur du bâtiment. Elle est destinée à faciliter le partage et la fluidité des échanges. A ce titre, des initiatives à l'international se multiplient de plus en plus visant à développer le déploiement du BIM. L'Union Européen recommandait l'usage du BIM en 2014, une date qui correspond à la modification de la directivité relatives au marché public « *chacun des 28 pays de l'UE devront pour des projets de construction financés par des fonds publics, encourager, spécifier ou rendre obligatoire d'ici 2017, l'utilisation de la modélisation des données du bâtiment* »⁸. A cet effet, en Janvier 2015, le Plan de Transition Numérique du Bâtiment a été lancé par le ministère du logement, légalité des territoires et de la ruralité, son objectif est d'accompagner les acteurs dans leurs transitions numériques et préparer le déploiement du numériques dans toute les filières du bâtiment, notamment dans l'architecture.

2.1.1. Définition :

Le BIM, aujourd'hui présenté comme une nouvelle pratique émergente. En revanche, ses principes étaient l'objectif que voulaient atteindre de nombreux chercheurs depuis longtemps, il a été pratiqué sans le savoir par des professionnels du bâtiment et cela depuis plus de 20 ans⁹. Il est l'accélération de la mutation de la CAO appliquée à l'Architecture, l'Ingénierie et la Construction (AIC) (Figure 18). Cette mutation est rendu possible grâce à l'avancée et l'innovation technologique qui ont contribué à l'évolution des capacités informatiques (logiciels et matériels). D'autres facteurs sont ainsi à l'origine de ce développement tel-que les nouveaux besoins de communication et de méthode de travail pour la gestion des projets complexes en termes de forme (conception), de matériaux et de normes imposées.

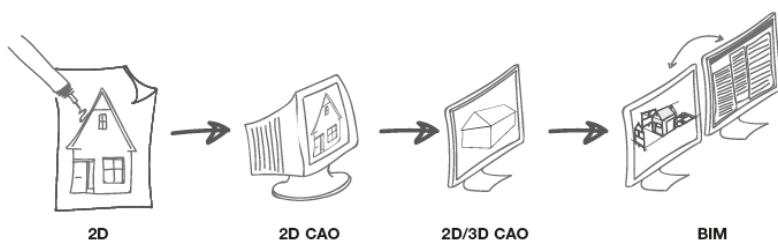


Figure 18 : Evaluation du processus de conception vers le BIM.

Source : <https://www.bimportal.be/nl/bim/algemeen/bim/>

⁸ La directive Européenne ‘‘Marchés publics’’ source : <https://www.industrie-techno.com/le-parlement-europeen-veut-systematiser-le-numerique-dans-la-conception-des-batiments-publics.27388>

⁹ Olivier Celnik, Eric Lebègue, BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction.

Editeur(s) : Eyrolles, CSTB. 2014

Le BIM peut être défini comme un modèle d'information unique du bâtiment, il regroupe à la fois la technologie et le processus de conception associés pour produire, communiquer et collaborer. Aussi, il regroupe tous les métiers du bâtiment, les informations géographiques et une base de données, composée d'un ensemble d'information pour chaque composant du bâtiment.

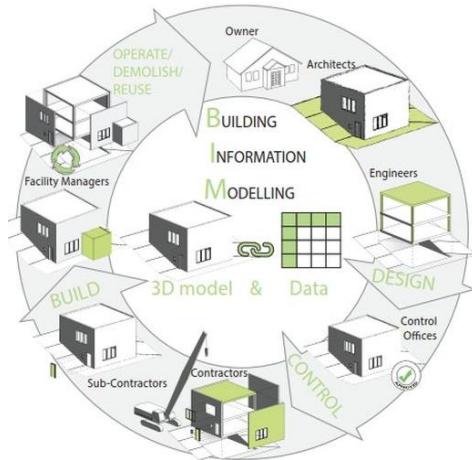


Figure 19: BIM et le cycle de vie du bâtiment.

Le BIM ne se limite pas à une série de logiciels informatiques ou à un modèle 3D de CAO. Il est important de noter que c'est un processus de travail collaboratif, reposant sur des logiciels spécifiques dit outils métiers qui permettent de concevoir et d'exploiter des modèles 3D renseignés, appelés maquettes numériques. Le BIM est destiné à faciliter à l'architecte la maîtrise de la conception architecturale complétée par l'intégration des informations nécessaires à la collaboration interne et externe¹⁰. Entant qu'un processus, il associe les intervenants autour d'un seul fichier, en décrivant la responsabilité et les limites d'intervention de chacun d'entre eux. « *Le BIM est polysémique, il regroupe à la fois la notion de la maquette numérique, de processus de travail collaboratif et de management des informations et des infrastructures* »¹¹.

Le BIM s'articule autour de trois axes, la maquette numérique, le travail collaboratif et l'interopérabilité.

2.1.2. La maquette numérique :

La maquette numérique est construite grâce à un logiciel métier qui permet de générer des objets 3D dans un environnement BIM. C'est un modèle 3D constitué de plusieurs objets paramétriques dont chacun est porteur de donnée et défini par une infinité de caractéristique. Elle voit le jour entre les mains de l'architecte, et ensuite rendu accessible aux différents bureaux d'études dans le but d'être complétée, modifiée, révisée et mise à jour.

La maquette numérique permet à l'architecte de visualiser le résultat de son projet avant même qu'il soit réalisé, ce qui évite les problèmes rencontrés sur chantier qui, entraînaient, avant le déploiement du BIM, des retards importants et des couts

¹⁰ Olivier Celnik, Eric Lebègue, BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction.

Editeur(s) : Eyrolles, CSTB. 2014

¹¹ <http://www.meeting-bim.com/Presentation?lang=fr>

supplémentaires. Ces problèmes peuvent être résolus au cours des premières phases de conception.

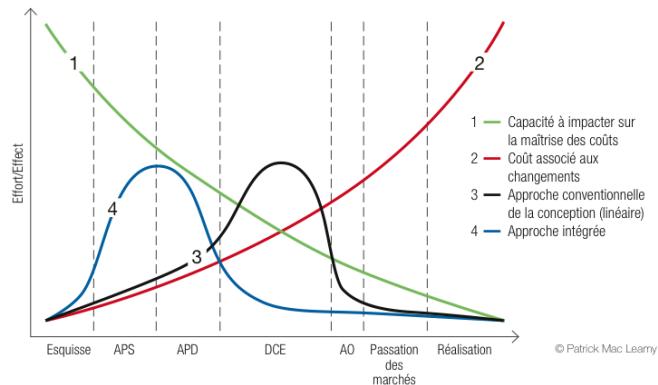


Figure 20: la capacité d'agir sur le cout et les changements en fonction du processus choisis

Malgré que cette étape demande un travail plus important par rapport à la méthode traditionnelle, les efforts et les couts sont bien maîtrisés et gérés dans les phases suivantes. (figure20)



Figure 21 : Représentation de la maquette numérique. Source : A360 Autodesk REVIT

Elle peut ainsi servir comme outil de communication qui, permet une meilleure compréhension et collaboration (Figure 21). Aussi, la maquette numérique est exploitable pour les calculs, la simulation et la vérification des normes et réglementations, cela dépend de la précision du modèle 3D et des données additionnelles requises. Les données supplémentaires à saisir relève du programme de simulation, à titre d'exemple, les études d'ensoleillements et l'analyse de vent nécessitent seulement le volume de l'enveloppe architecturale, sa localisation et la nature de l'environnement dans lequel il se trouve (bâti ou non bâti), contrairement à l'étude énergétique ou structure qui demande plus de détail.

2.1.3. Le travail collaboratif

Avant l'apparition du BIM, les acteurs du projet n'avaient pas la possibilité de travailler en étroite collaboration, car les logiciels DAO et CAO ne permettent pas de travailler à plusieurs sur une seule base de donnée, avec le BIM, la maquette numérique offre la possibilité aux différents intervenants quel que soit leurs localisations ou spécialités d'apporter des modifications qui apparaissent en temps réelle chez les autres intervenants.



Figure 12: Les trois niveaux de communication du BIM

Le BIM est connu par trois différents niveaux de communication, le premier est le BIM isolé, ou chacun des intervenants utilise sa propre maquette numérique qu'il a modélisée. Les échanges se fassent à sens unique selon les besoins de l'intervenant.

Le second est le BIM collaboratif, c'est une collaboration entre architecte, BET et entreprise autour d'une maquette numérique partagée. Chaque intervenant travaille sur sa propre maquette, la restitution et l'intégration des informations sont assurées par un autre profil dit le BIM manager. Cette collaboration peut commencer à deux et au fur et à mesure de l'avancement du projet, elle intègre d'autres intervenants.

Le BIM intégré, c'est l'utilisation d'une maquette unique et partagée par tous les intervenants, le BIM manager assure le contrôle de qualité et la normalisation des informations par apport à la charte BIM. Dans ce cas, les intervenants ont la possibilité de s'y connecter afin d'alimenter ou d'exploiter les données déjà stockées.

2.1.4. L'interopérabilité

L'interopérabilité est définie par la capacité de transférer de manière efficace des données de projet vers différents intervenants et plateformes d'échange. Cela permet à chaque intervenant de mieux exploiter les informations et les données stockées. De nombreux logiciels sont utilisés depuis la conception jusqu'à la construction. De ce fait, l'architecte ne doit pas négliger l'importance de l'interopérabilité des outils, l'envoie du fichier entre les BET et L'entreprise doit se faire sous un format qui leurs permettent de travailler d'une manière optimale.

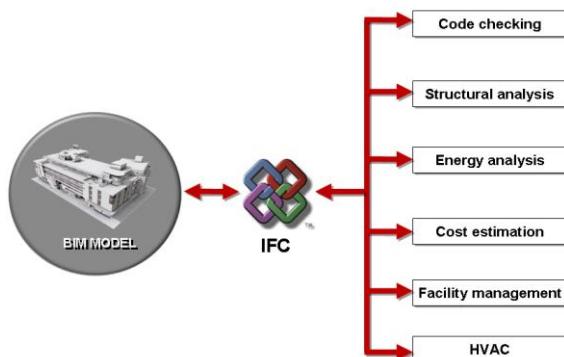


Figure 13: l'interopérabilité entre le model BIM et Les logiciels de simulation

Travailler avec plusieurs logiciels demande une interopérabilité efficace, elle doit exister à plusieurs niveaux (figure 13), entre les concepteurs d'une même agence, entre les projeteurs qui travaillent sur plusieurs sites, entre les différentes phases de projet et entre les multiples logiciels utilisés par un export d'un standard lisible sous format IFC.

Versions	Année	Formats
IFC 1.0	Janvier 1997	 .ifc : C'est le format d'échange le plus utilisé, utilisant la structure STEP conformément à la norme ISO10303-21
IFC 1.5	Décembre 1997	
IFC 1.5.1	Juillet 1998	
IFC 2.0	Avril 1999	
IFC 2x	Octobre 2000	 .ifcXML : utilise la structure XML, peut être généré par l'application ou à partir d'un fichier .ifc. Ce format est en moyenne 300 à 400% plus gros que le fichier .ifc
IFC 2x - Add 1	Octobre 2001	
IFC 2x2	Mai 2003	
IFC 2x2 - Add 1	Juillet 2004	
IFC 2x3	Février 2006	 .ifcZIP : utilise l'algorithme de compression Ce format compresse de 60 à 80% un fichier .ifc
IFC 2x3-TC1	Juillet 2007	
IFC 4	Mars 2013	
IFC 4 - Add 1	Juillet 2015	
IFC 4 - Add 2	Juillet 2016	
IFC 5	A venir	

Figure 14 : l'évolution de l'IFC et ses différents formats

2.2. Le BIM dans les agences d'architecture

2.2.1. Le BIM et la place de l'architecte :

L'intégration du BIM dans les agences d'architecture a créé le même débat qui a bouleversé autrefois la profession lorsque Autocad est apparu dans les années 80. Les architectes avaient du mal à se séparer de leurs planches et tables de dessin pour intégrer le monde de l'informatique. Ils pensaient que l'outil informatique influence sur l'architecture et remplace l'architecte dans certaines tâches, d'autant plus avec l'apparition des outils d'aide à la conception avec comme prétexte que le codage et les formules mathématiques vont remplacer forcément la créativité de l'architecte.

Avec le BIM, les arguments que donnaient les professionnels concernant le refus de son intégration dans les agences d'architecture étaient non seulement une question d'influence sur la qualité architecturale mais aussi ils trouvent que « *le BIM n'est pas qu'un outil informatique neutre au service de l'architecture..., mais bel et bien un outil idéologique néo-libéral et managérial uniformisant. Pour cela, il suffit de regarder qui le soutient, le défend et le promeut.* »¹². De ce fait, l'architecte va non seulement perdre sa place, en se référant au BIM Manager qui va le remplacer et chapeauter plusieurs missions mais aussi sa fonction sera limitée à concevoir d'un point de vue artistique « *Exit l'architecte, bienvenue le Directeur Artistique Architecte, prestataire de service.* »¹³.

A présent le BIM connaît une forte montée en puissance non seulement au sein des grandes agences d'architecture mais aussi les petites agences qui commencent à s'intéresser à

^{9,10et11} Article : mais qui pousse eu BIM ? Lien : <https://labeilleetlarchitecte.wordpress.com/2015/05/26/mais-qui-pousse-au-bim/>

l'intégration de cette pratique. L'architecte Olivier AREN, architecte associé 2/3/4 architecture, trouve que BIM est la dernière chance des architectes de redevenir les maîtres d'œuvre qu'ils ont cessé d'être. Le bouleversement des marchés publics vers les marchés privés a engendré la multiplication de la maîtrise d'œuvre qui n'est pas forcément des agences d'architecture, elle est souvent dirigée par un ingénieur. Dans cette nouvelle structure de maîtrise d'œuvre, la fonction de l'architecte est limitée en phase d'esquisse, l'architecte qui est censé être le chef d'orchestre de son projet est devenu un directeur artistique, ce qui explique les défauts de conception et les erreurs de synthèse qu'on les aperçoit sur les chantiers. « ... Pour ceux de mes confrères qui suivent encore leurs chantiers, ils ont tous pu constater à quel point les « défauts de synthèse » polluent et dégradent leurs projets depuis près de quinze ans maintenant, alors que l'essentiel de la profession se bat au quotidien pour essayer de constituer des dossiers de conception aboutis... »¹⁴. Cette nouvelle pratique va permettre à toute l'équipe de maîtrise d'œuvre de mener les projets à bien et de travailler ensemble d'une façon concrète et maîtrisée, tout en définissant les règles entre les divers acteurs de la maîtrise d'œuvre.

L'ordre des architectes quant à lui, encourage les architectes à adopter ce processus et piloter la mission BIM, il trouve que le BIM est une opportunité qui s'offre aux architectes afin d'affirmer leurs places et rester garant de la qualité architectural produite « l'architecture est à la fois un art de la conception et de la vérification des propriétés à laquelle cette dernière doit reprendre »¹⁵.

2.2.2. L'intégration du BIM dans les agences d'architecture en quelques chiffres :

Durant ses dernières années, les architectes s'intéressent de plus en plus à cette pratique. En juin dernier, une enquête était menée auprès des agences d'architecture, le CNOA a proposé aux architectes inscrits au tableau de l'ordre un questionnaire dans le cadre d'une recherche, l'objectif était d'interroger les professionnels sur le déploiement des nouveaux outils numériques et leurs positionnement à l'égard du BIM.

Avec un retour remarquable et une forte participation, on a noté plus de 1 000 repenses provenant non seulement des agences de grande et moyenne taille mais aussi des agences de 1 à 4 personnes qui présentaient le ¾ des repenses dont 90% affirment leurs intérêt pour le BIM. Parmi eux un sur deux architectes s'intéressaient à cette pratique depuis seulement 2 ans, ce qui illustre l'intérêt que portent les architectes aux nouveaux outils numériques et à la pratique BIM.

¹⁴ Le BIM est la dernière chance des architectes de redevenir les maîtres d'œuvre qu'ils ont cessé d'être », par Olivier ARENE, architecte. Lien : <https://www.amc-archi.com/article/le-bim-est-la-derniere-chance-des-architectes-de-re-devenir-les-maitres-d-uvre-qu-ils-ont-cesse-d-etre-par-olivier-arene-architecte,1552>

¹⁵ Le BIM est la dernière chance des architectes de re-devenir les maîtres d'œuvre qu'ils ont cessé d'être », par Olivier ARENE, architecte. Lien : <https://www.amc-archi.com/article/le-bim-est-la-derniere-chance-des-architectes-de-re-devenir-les-maitres-d-uvre-qu-ils-ont-cesse-d-etre-par-olivier-arene-architecte,1552>

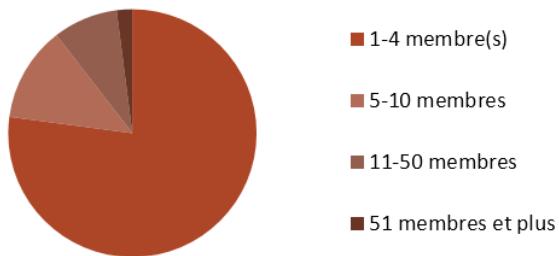


Figure15: Profils présente les repenses prévenantes des agences de différentes tailles

Les architectes commencent à s'intéresser au BIM à partir de 2009 et le nombre connaît une croissance remarquable à partir de 2015, ils sont 447 à avoir déployé et intégré le BIM dans leurs agences d'architecture, une date qui correspond à la mise en place du Plan de transition numérique du bâtiment (figure 16). De plus, les architectes qui ont déjà intégré le BIM dans leurs agences d'architecture représentent 27% des architectes questionnaient et 11% envisage de le faire dans les quelques mois qui viennent. Les quarts des architectes n'envisagent pas (pour l'instant) de passer à cette étape pour les couts élevés d'investissements et les lacunes en informatique. Le reste des architectes pensent à migrer vers le BIM mais dans le moyen terme.

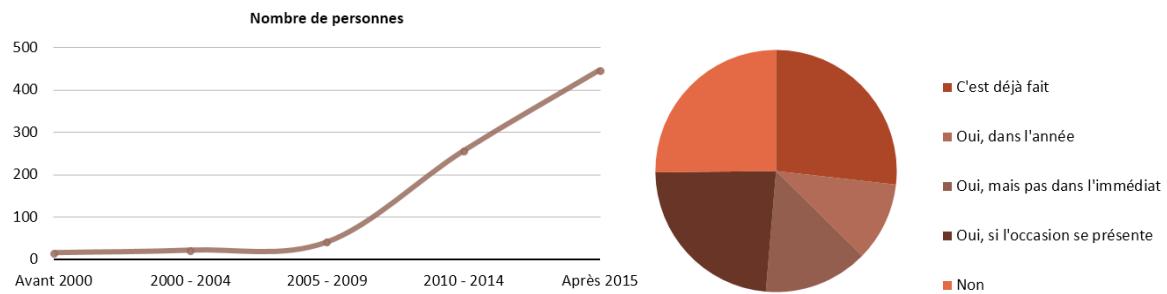


Figure16: le déploiement et l'intégration du BIM dans les agences d'architecture

Le déploiement du BIM n'est pas limité aux types d'opérations ou tailles des projets, les architectes affirment leurs utilisations de ce processus dans différent projets, y compris pour une maison individuelle.

2.3. L'outil métier peut-il brider l'architecture ?

L'une des caractéristiques du BIM réside dans la fusion d'une base de données dans un modèle 3D, cela ne peut se faire que sur des logiciels dits « logiciel métier » qui permet la construction et le développement des maquettes numériques tout en assurant le travail collaboratif de différents intervenants (Figure17).

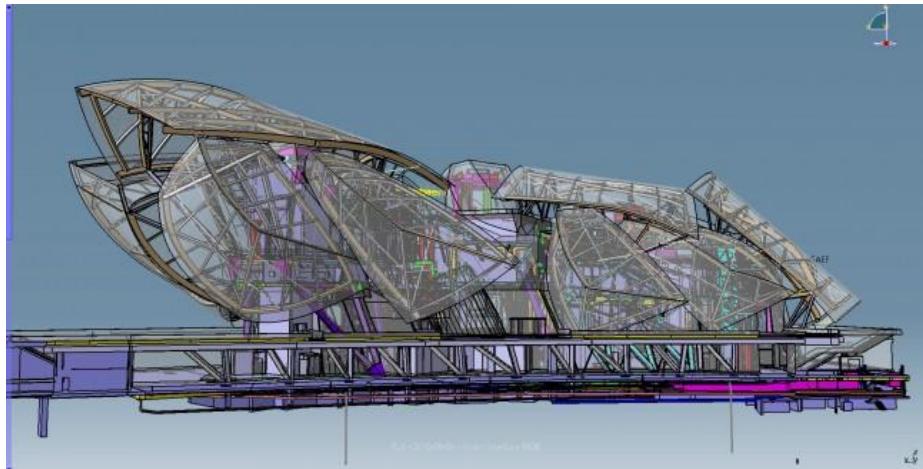


Figure 17: maquette numérique de la FLW présente les différents lots insérés dans un seul modèle 3D.

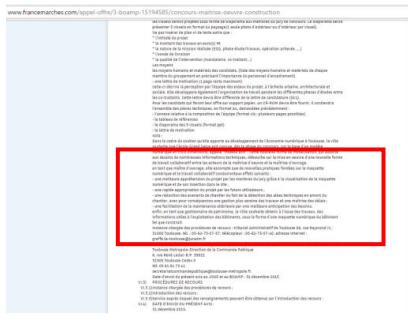
Source : gehrystechnologies.com

Ce type de logiciel selon certains architectes influence sur la qualité de la production architecturale, ils «...brident la créativité de l'architecte et ... limitent la conception à des formes parallélépipédiques... »¹⁶ Car « ...ces logiciels n'ont pas la souplesse des modeleurs 3D»¹⁷. En outre, contrairement aux logiciels DAO, les logiciels métiers ne permettent pas aux architectes de libérer leurs créativités, car la complexité de ce type de logiciel pousse l'architecte à simplifier sa conception afin de faciliter la modélisation et d'éviter la perte de temps, vu qu'il conçoit souvent dans la précipitation. De ce fait, un nouveau style architectural d'une volumétrie simple va désormais être « commercialisé » au nom de cette nouvelle pratique dite BIM qui est imposée par le marché du bâtiment. Ce qui explique l'apparition des volumes parallélépipédiques simples qui envahissent le monde de l'architecture. Cette architecture bridée sera par la suite cachée par des panneaux et des produits industrialisés, et la discipline de l'architecture va perdre l'un de ces principes (la recherche formelle) et sera résumée par un travail qui peut être fait par d'autre corps de métier.

De plus, le temps phénoménal que le concepteur va consacrer à modéliser le projet sera perdu pour la réflexion conceptuelle. Dans un environnement BIM, l'architecte est préoccupé souvent à intégrer des données et des informations à son modèle 3D, car les maîtres d'ouvrage imposent même en phase de concours la maquette numérique comme critère de sélection par laquelle le projet sera évalué, ce qui va limiter toute possibilité à l'architecte de travailler avec créativité et souplesse son projet architectural.

¹⁶ BIM or not to BIM, that is the question... par Séverin Schaefer, Lien : <https://www.amc-archi.com/article/to-bim-or-not-to-bim-that-is-the-question-par-severin-schaefer-architecte-et-bim-manager,2058>

¹⁷ BIM or not to BIM, that is the question... par Séverin Schaefer, Lien : <https://www.amc-archi.com/article/to-bim-or-not-to-bim-that-is-the-question-par-severin-schaefer-architecte-et-bim-manager,2058>



nota :

Dans le cadre du soutien qu'elle apporte au développement de l'économie numérique à Toulouse, la ville souhaite que l'école Grand Selve soit conçue, dès la phase du concours, sur la base d'un modèle numérique en trois dimensions, appelé "modèle BIM". Cette nouvelle forme de modélisation, qui associe aux dessins de nombreuses informations techniques, débouche sur la mise en oeuvre d'une nouvelle forme de travail collaboratif entre les acteurs de la maîtrise d'oeuvre et la maîtrise d'ouvrage.

en tant que maître d'ouvrage, elle escompte que de nouvelles pratiques fondées sur la maquette numérique et le travail collaboratif conduiront aux effets suivants :

- une meilleure appréhension du projet par les membres du jury grâce à la visualisation de la maquette numérique et de son insertion dans le site ;

Figure 18: appel d'offre au concours de construction d'un groupe scolaire à Toulouse en 2015.
Source : francemarches.com

Contrairement à d'autres architectes qui ont déjà adopté le processus, par obligation (par le maître d'ouvrage (figure 18)) ou par choix (l'agence AMNA à adopter le BIM il y presque 7 ans)¹⁸, affirment que le logiciel métier ne bride pas l'architecture mais demande une certaine maîtrise tout comme d'autres logiciels. Le logiciel métier est un outil avec lequel la pratique et le mode d'élaboration d'un projet sont évolués. Il n'est qu'un outil de traduction de l'imagination de l'architecte pour la faire communiquer à d'autres intervenants qui peuvent par la suite travailler en collaboration (figure 19). François Pélegrin déclare que le BIM « ... va révolutionner nos pratiques et le mode d'élaboration des projets (mais ce n'est qu'un outil ; sans le talent et la compétence des acteurs, il ne fera pas de miracle) »¹⁹.

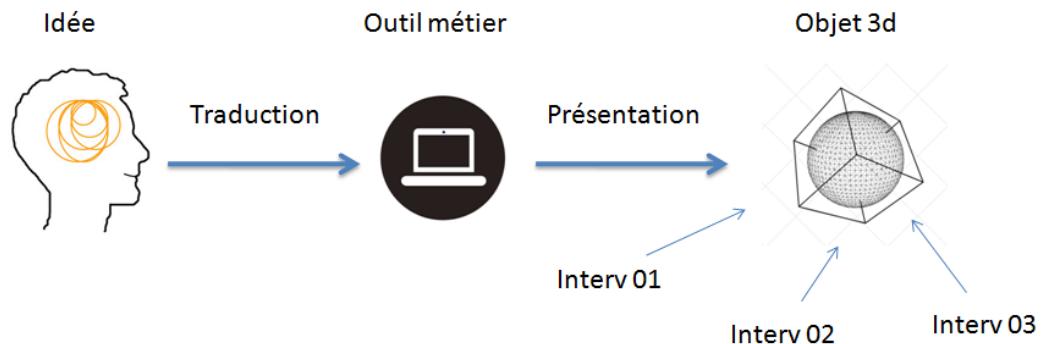


Figure 19 : Traduction de l'idée en forme via un logiciel.

Source : l'auteur du mémoire Sarra BENSAHA

Emmanuel Di Giacomo, architecte, conseiller technique et méthodologique BIM sur Autodesk Revit pour la région Europe du Sud, lors de la conférence du 19 mai 2017 à ENSA-Paris-Val-De-Seine, sous le thème Analogique, numérique et BIM, il a mis l'accent sur l'impact des outils numériques métiers sur la créativité architecturale en affirmant que la créativité de l'architecte est la seule qui peut brider la qualité architecturale. Il a démontré lors de la conférence une expérimentation où il a modélisé une forme qui n'est ni simple ni parallélépipédique sur un logiciel métier tel-que REVIT, grâce à une option développée sur Revit appelée « composant adaptatifs ».

¹⁸ Déclaré par Ceril Trétout (architecte, urbaniste associé) lors de l'événement les 4ème assises du BIM en 2017.

¹⁹et ¹⁹ François Pélegrin, *BIM comme Bouleversement Interprofessionnel Majeur. BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*. Groupe Eyrolle et CSTB. Edition 2015. Page 192

Ou'est-ce qu'un composant adaptatif ?

Le principe du composant adaptatif comme indique son nom, est un motif qui s'adapte à un panneau déjà modélisé et peut être utilisé dans des systèmes de répétition générés par un réseau composé de plusieurs composants conformes aux contraintes définies par l'utilisateur.

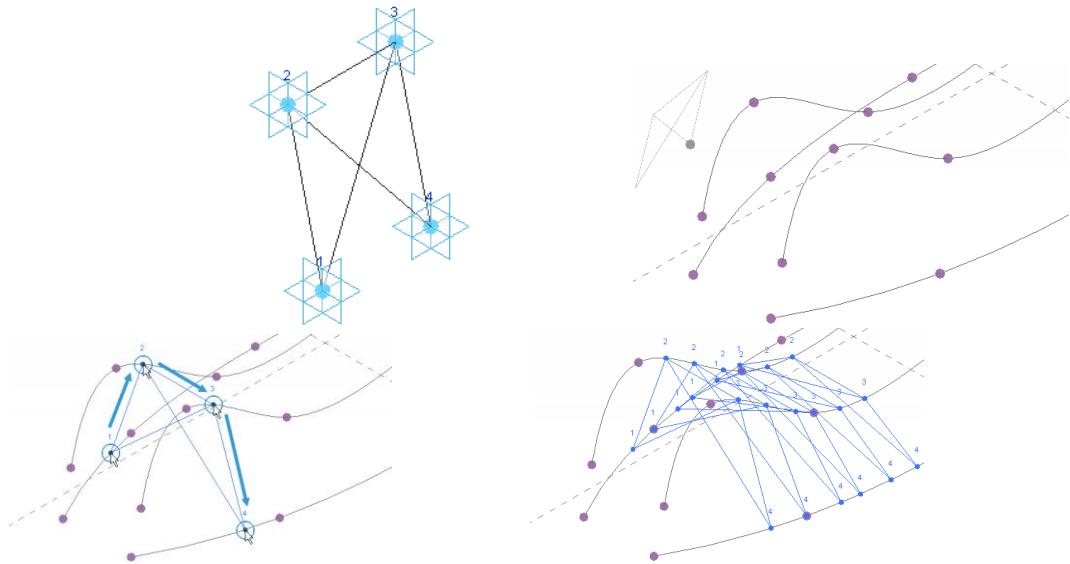


Figure 20: Composant adaptatif sur REVIT. Source : REVIT architecture

Malgré que cette méthode favorise la génération des formes complexes mais elle reste longue et demande une bonne maîtrise du logiciel et un temps phénoménal pour la faire.

Ce type de logiciel est connu par le caractère d'interopérabilité qui offre à l'architecte la possibilité de générer des formes et de les développer sur un autre logiciel, par la suite les transférer dans un logiciel métiers pour le partage, la communication et la collaboration entre les intervenants, comme il peut créer des formes complexes sur des logiciels métiers à l'aide des plugin développés pour faciliter la création sur ce type de logiciel.

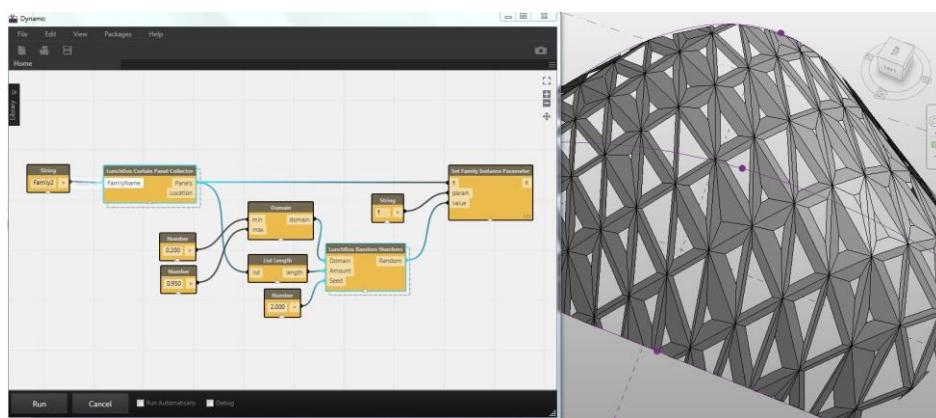


Figure 21: modélisation d'une forme sur REVIT via dynamo

*Le BIM (l'outil métier) ne bride pas l'architecture mais l'imagination de l'architecte qui peut la brider²⁰, La représentation manuelle de l'idée par le dessin peut être nécessaire pour certains architectes afin de développer et libérer la création avant de passer à l'outil, telle que E. Di Giacomo qui trouve que « *Chacun est libre de faire ce qu'il souhaite,Je continue à dessiner d'une manière manuelle, parce que il est important pour moi de maîtriser l'espace et les volumes que je représente... mais au moins je sais que je ne dépend pas d'un outil* »²¹.*

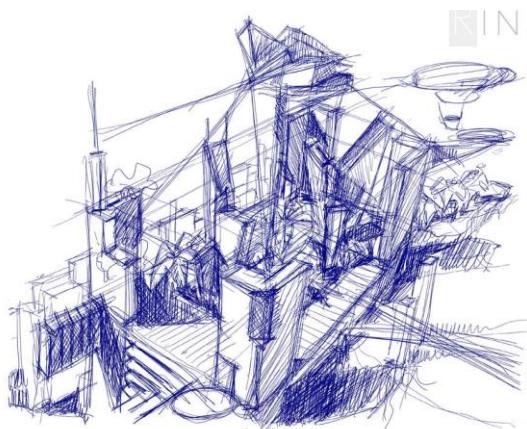


Figure 22 : Croquis de la cité utopique.
par E. Di Giacomo



Figure 23: modélisation de la cité utopique.
par E. Di Giacomo

Le BIM avec son caractère de base de données offre la possibilité d'insérer de différents paramètres (ensoleillement, les paramètres thermiques et acoustiques) dans la maquette numérique, ce qui permet à l'architecte de concevoir une architecture qui s'intègre parfaitement avec son environnement tout en étant conditionné par les contraintes de divers réglementations. L'Agence Architecture Pélegrin²² a intégré les données relatives aux articles du PLU dans la maquette numérique pour le permis de construire des logements sociaux en Seine et Marne, le premier connu en France.



Figure 24: les logements sociaux en Seine et Marne par l'architecte François Pélegrin

²⁰ Emmanuel Di Giacomo, conférence "Analogique, numérique et BIM, impact des outils sur la créativité architecturale" 2017.

²¹ Emmanuel Di Giacomo, conférence "Analogique, numérique et BIM, impact des outils sur la créativité architecturale" 2017.

²² <http://www.lemoniteur.fr/article/permis-de-construire-premiere-instruction-avec-le-bim-32129666>



Figure 25: Thomas GOGNY / LE MONITEUR - Présentation de l'instruction du permis de construire via la maquette numérique par l'architecte François Pélegrin

« ... C'est lui (l'architecte) qui s'assure que les formes spéciales ainsi créées conjuguent harmonieusement les différentes contraintes à satisfaire : intégration au site, conception bioclimatique, respect du programme et les différentes règlements tels que le PLU. C'est également lui qui apporte ce supplément d'âme qui donne du sens au projet et produit de l'architecture et pas simplement de la construction. »²³

2.4. Standard et non standard :

La pensée architecturale était traduite, auparavant, par des travaux manuels où tout était réalisé à la main. Les architectes trouvaient que cette méthode donne une grande liberté et offre à l'architecte, qui était issu à cette époque de la formation des beaux-arts, la possibilité de personnaliser sa création architecturale. Avec l'arrivée de l'outil informatique au début des années 80, une frange importante des architectes pensaient que l'ordinateur va nuire au métier de l'architecte, ils réagissaient de la même manière que les architectes d'aujourd'hui qui trouvent que le BIM standardise la production architecturale (que ça soit dans la forme ou dans les composants).

Contrairement au DAO qui est un dessin au trait, le BIM est un assemblage et positionnement des objets en 3D modélisés et paramétrés appelés « Familles », ont également un comportement "intelligent"²⁴, sont définis dès le départ par des caractéristiques géométriques et des données numériques. Le caractère paramétrique leur permet de s'adapter selon leurs mises en place et d'être déclinés en type (plusieurs tailles) (**Figure26**).

²³ François Pélegrin, *BIM comme Bouleversement Interprofessionnel Majeur. BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction.* Groupe Eyrolle et CSTB. Edition 2015. Page 192

²⁴ BIM or not to BIM, that is the question... par Séverin Schaefer, Lien : <https://www.amc-archi.com/article/to-bim-or-not-to-bim-that-is-the-question-par-severin-schaefer-architecte-et-bim-manager,2058>

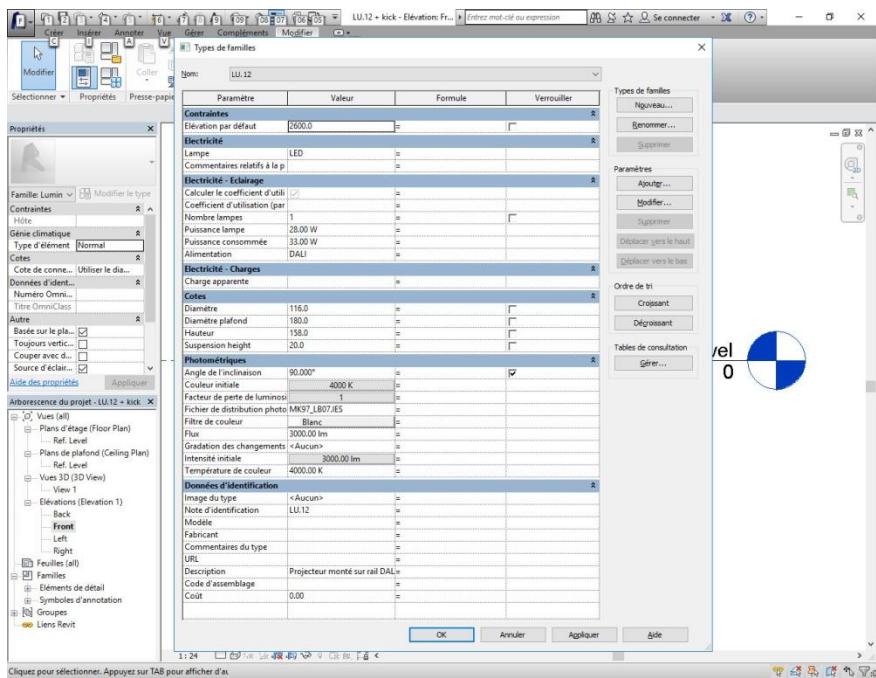


Figure 26: les paramètres d'un type de famille sur REVIT

La forme du bâtiment devient donc un assemblage d'objet comportant des éléments standardisés dont la conception est réutilisable. Les sites internet offrent et proposent une grande variété de bibliothèques qui contient un nombre important de famille de produit d'objet paramétrique, issus des catalogues de fabricants et mises à la disposition des concepteurs et des clients. *Il suffit d'insérer ou de « copier-coller » ces éléments pour remplir les tiroirs en un temps record²⁵ selon Olivier DUFAUT*. Certain architecte trouve que le BIM s'impose de plus en plus dans le domaine de l'architecture et du bâtiment au nom de la rentabilité et la réduction de délais, ce qui va engendrer une production architecturale industrialisée similaire et standard.

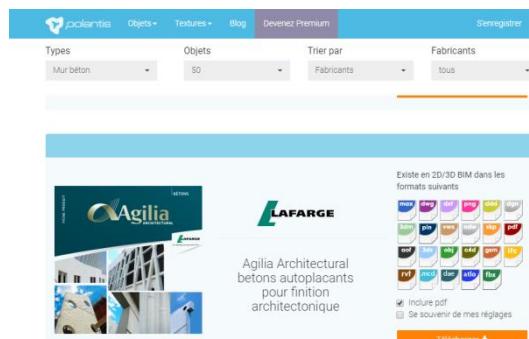


Figure27: Objets à télécharger depuis un catalogue en ligne.

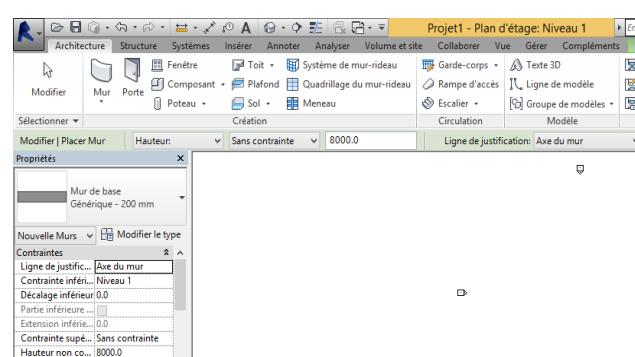


Figure28: Objet à télécharger depuis la bibliothèque du logiciel (REVIT)

En revanche, ce type de logiciel offre la possibilité de concevoir à chaque projet des familles personnalisées qui peuvent être par la suite transmises aux fabricants. Grâce à ce type de logiciel, les changements sont rapides, dès que l'architecte effectue une modification

²⁵ Olivier Dufaut, article : L'armoire à plans, Fable industrielle et Bureaucratique. Source : <http://le-debat.gallimard.fr/articles/2009-3-1-armoire-a-plans-fable-industrielle-et-bureaucratique/>

²⁶ d'un élément (objet/famille) ou une partie du projet, le changement se réalise sur l'ensemble du dossier (plan, façade, coupe). Cet outil offre aussi, en même temps, une énorme base de donnée mis à jour automatiquement après une modification faite par l'architecte (nomenclature, quantitatif, estimatif...), le temps gagné peut être consacré à la conception.

Louis PAILLARD dans son article le BIM, un Workshop interactif, relève les difficultés qu'il a rencontré lors du déploiement du BIM, en relation avec le logiciel métier, il trouve que modéliser l'ensemble du bâtiment demande du temps au démarrage ainsi que la création des familles paramétriques longue à élaborer car le logiciel métier est un outil complexe sollicitant une certaine expérience. *Ne pas maîtriser cet aspect du logiciel condamne l'architecte à n'utiliser que les éléments de bibliothèque de l'éditeur du logiciel ou de fabricants disposant d'un catalogue.*²⁷

Malgré que les projets de renommée internationale sont conçus et construits suivant le processus BIM dès la première phase de conception, on ne constate aucune standardisation et simulation formelle. De plus, « *certaines projets n'auraient pas pu être menés à bien sans les technologies mises en jeu par la maquette numérique : c'est le cas par exemple de la Fondation Louis Vuitton.* »²⁸. (Figure 29)

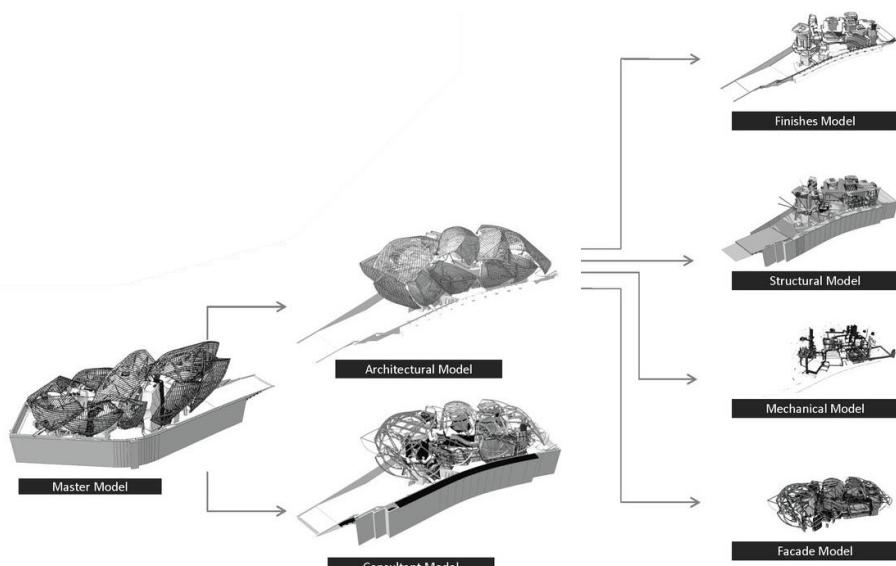


Figure 29: les différents modèles 3D en fonction des lots ou intervenants du projet de la fondation Louis Wilton

Ce projet était un grand défi qui a été relevé avec succès (selon les participants). La réalisation d'une œuvre d'une extrême ambition imaginée par l'architecte telle une sculpture a pu être construite grâce au BIM qui n'empêche en aucun cas l'architecte à développer son idée sous forme d'un croquis (**Figure 30**) ou d'une maquette physique.

²⁶ Louis Paillard, *le BIM, un workshop interactif*. Lien : <https://www.amc-archi.com/article/le-bim-un-workshop-interactif-par-louis-paillard-architecte,1564>

²⁷ BIM or not to BIM, that is the question... par Séverin Schaefer, Lien : https://www.amc-archi.com/article/to-bim-or-not-to-bim-that-is-the-question-par-severin-schaefer-architecte-et-bim-manager_2058

²⁸ http://www.syntec-ingenierie.fr/wp-content/uploads/_mediavault/2017/01/2014-05-09-cahier-moniteur-bim-maquette-contenu-niveau-developpement.pdf

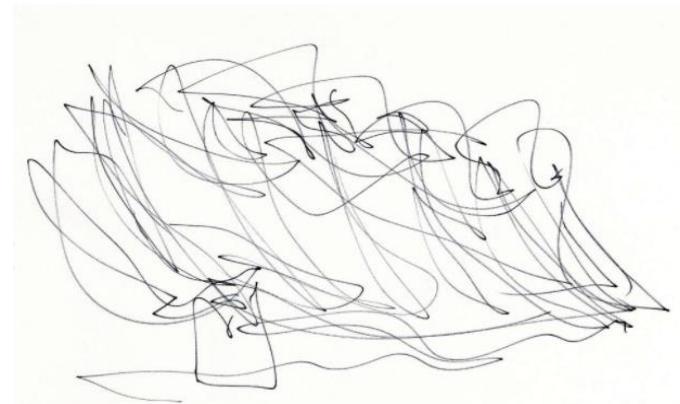


Figure 30: Croquis de la FLW par F. Ghery

Un autre exemple, le projet de l'Aréna 92 est conçu par l'architecte CHRISTIAN DE PORTZAMPARC. (**Figure 30**)



Figure31: projet de l'Aréna 92, CHRISTIAN DE PORTZAMPARC

Les éléments constitutifs de la coque de l'Aréna Nanterre n'ont pas été téléchargés depuis le site d'un fabricant mais l'opération avait pris le sens inverse, l'équipe a modélisé la forme du bâtiment et a transmis des documents 2D et 3D pour la fabrication des panneaux personnalisés et spécifiques à ce projet (**Figure 31**). La coque était fabriquée pièce par pièce par 26 moules, c'est l'un des projets qui témoignent la conception et la fabrication des objets personnalisés qui ne peuvent être installés qu'à l'Aréna 92.

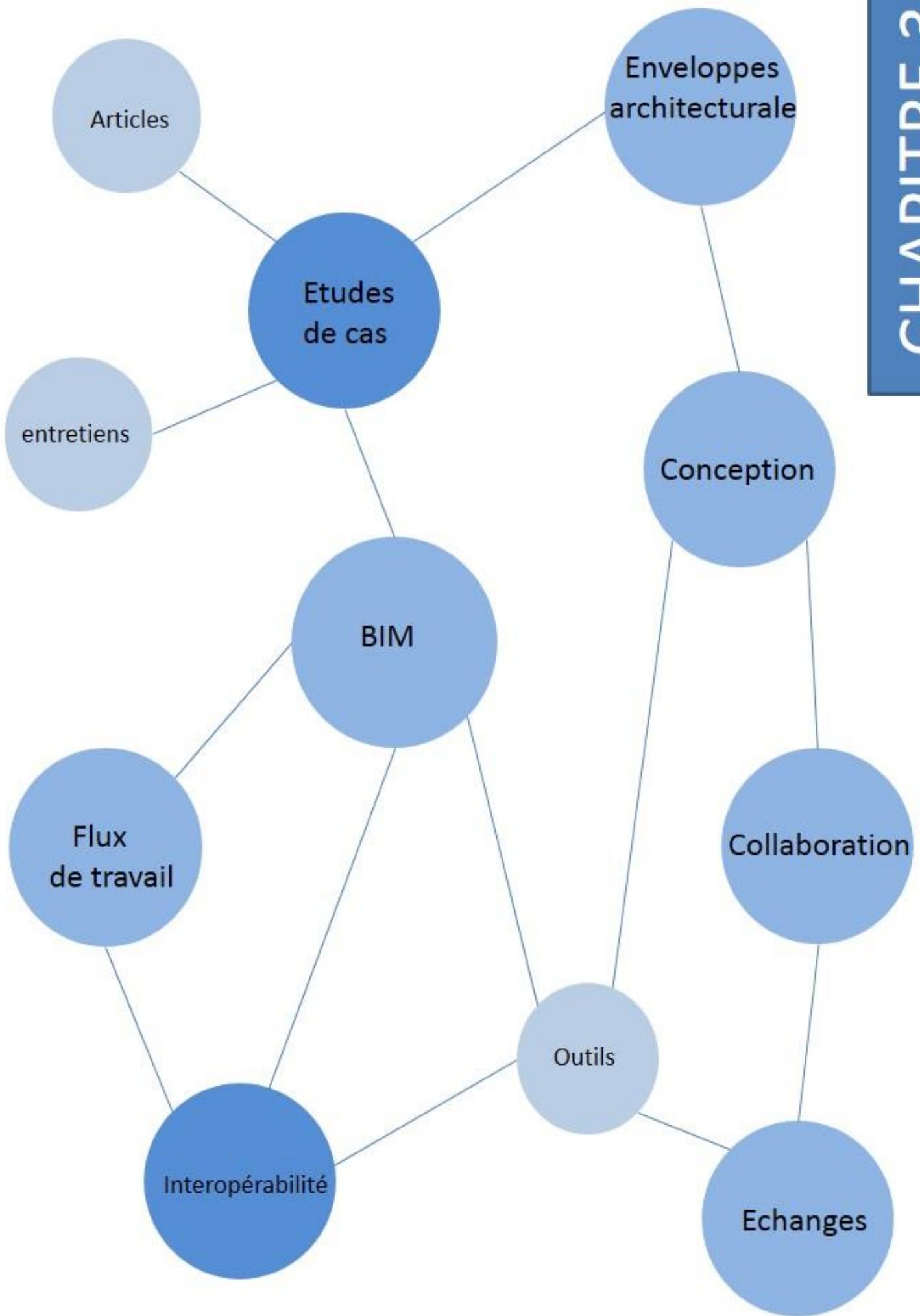


Figure 32et 33 : La mise en place des coques en béton préfabriquées de l'aréna 92

CONCLUSION :

D'après les pratiquants de ce processus, pour que le déploiement du BIM n'influence en aucun cas sur la qualité architecturale, une bonne maîtrise des logiciels métiers est nécessaire. Dans le cas contraire, l'architecte va non seulement simplifier sa conception mais aussi il va insérer des éléments préfabriqués proposés par des éditeurs de logiciel ou des fabricants. Cela va engendrer la création d'une architecture bridée mais aussi standardisée.

De plus, le BIM a redéfini le processus de conception architecturale, il a introduit de nouveaux intervenants, qui travaillent en étroite collaboration avec l'architecte pour l'élaboration du projet architecturale, notamment les enveloppes. Ces positionnements nous ont poussés à vérifier, par l'analyse de deux cas d'études (dans le prochain chapitre), et voir si le BIM n'influence vraiment pas sur la conception architecturale ou il est seulement soutenu par les promoteurs du BIM qui affirment son efficacité pour différentes raisons.



3.1. Cas d'étude N° 01 : le projet de Stade de Hangzhou

Le projet a été choisi comme cas d'étude en raison de son processus de conception, du déploiement du BIM et du flux du travail (workflow) défini par l'équipe de NBBJ afin d'assurer une fluidité d'échange et une meilleure collaboration entre architecte et ingénieurs. L'objectif était de concevoir une forme innovante et de réduire la consommation d'acier pour la structure.

Mots clés : Collaboration internationale, interopérabilité, conception paramétrique, recherche formelle, collaboration architecte-ingénieur, enveloppe architecturale et structurelle.

3.1.1. Présentation de l'agence :

NBBJ est connu comme l'un des leaders de la pratique des technologies digitales. L'un de ces objectifs est de renforcer les compétences en conception numérique et développer la pratique BIM grâce à l'une de ses équipes dite « Digital practice ». L'agence regroupe ainsi plus de 700 personnes : chercheurs, architectes, urbanistes...etc. à l'échelle internationale.

3.1.2. Présentation du projet :



Figure 34 : Le stade de Hangzhou, chine. Conçu par NBBJ

Le stade de Hangzhou, conçu par le NBBJ en collaboration avec le CCDI, est un bâtiment sportif polyvalent de 80 000 places situé à Hangzhou en Chine. L'enveloppe architecturale s'inspire de la flore trouvée sur les bords du lac Tai à l'ouest de Hangzhou. Cette référence a été choisie pour créer une image puissante et symbolique du fleuve QianTang. La construction a été lancée en 2011.

3.1.3. Processus de conception et flux du travail :

Le projet du stade de Hangzhou illustre l'utilisation de la technologie numérique dans la pratique architecturale. L'équipe de NBBJ a développé et a mis en œuvre des workflows personnalisés pour l'optimisation des échanges d'informations lors de la phase de conception.

L'équipe de conception devait s'adapter à des situations diverses. Elle a développé des flux du travail non standards afin d'établir des solutions spécifiques et personnalisées à des problèmes rencontrés lors du processus de conception.

1. Objectifs :

Le stade de Hangzhou est une installation conçue par NBBJ avec l'association de CCDI. Leur stratégie était de concevoir et de renseigner la géométrie complexe de la coque extérieure du stade, tout en travaillant en collaboration pour procéder par la suite à la fabrication. L'enveloppe a été conçue après avoir mis en place un programme paramétrique pour la modélisation géométrique qui permettait d'obtenir des réponses rapides à tout changement de conception, d'effectuer des optimisations et de simuler des variantes, pour partager les documents entre les différents intervenants à l'échelle internationale. Il a été nécessaire de définir un processus d'échange et de communication, prenant en compte les différents logiciels utilisés par les participants (interopérabilité).

La problématique et les défis que l'équipe avait rencontré peuvent se résumer en 3 points :

1. La possibilité d'apporter des changements, des modifications et la fluidité du processus de conception.
2. La mise en œuvre d'un flux de travail personnalisé afin d'établir une procédure d'échange avec l'équipe de CCDI.
3. Prendre en compte les différents outils utilisés par chaque intervenant et leurs compétences.

2. Processus de conception, méthodes et flux du travail :

Le processus de conception est basé principalement sur les tâches suivantes :

a- Traduction : de l'idée à la forme- composition géométrique

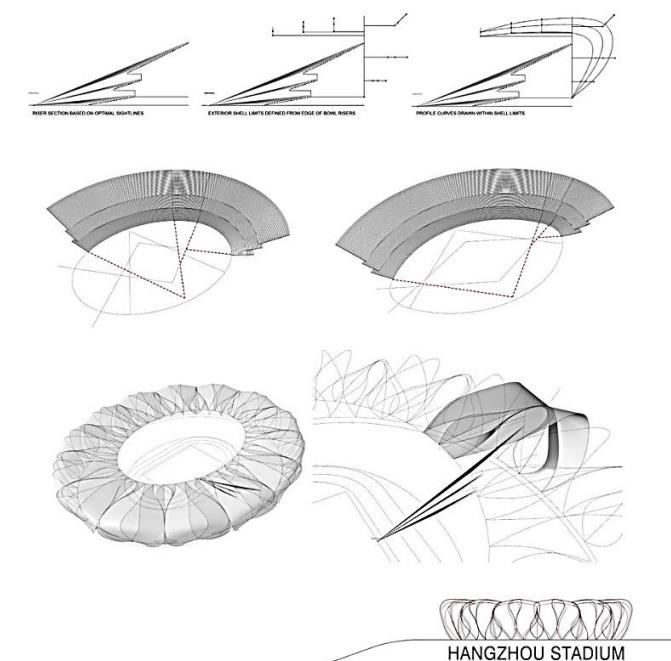


Figure 35 : Le processus de conception (la recherche formelle) du stade Hangzhou. Source : NBBJ

L'objectif principal était de modéliser une enveloppe qui offre aux spectateurs la protection contre le soleil et la pluie et avoir un espace couvert pour les équipements

d'éclairages. Ces contraintes ont été prises en compte et intégrées dans la programmation paramétrique. (Figure 35)

La conception de l'enveloppe était basée principalement sur une surface à double courbe développée à partir d'un arc circulaire, un système modulaire a été défini de manière paramétrique par la méthode de nuages de points utilisés comme des points de contrôle pour définir les courbes de bord de la surface. Les surfaces à double courbe générées prennent la forme d'un pétale. (Figure36)

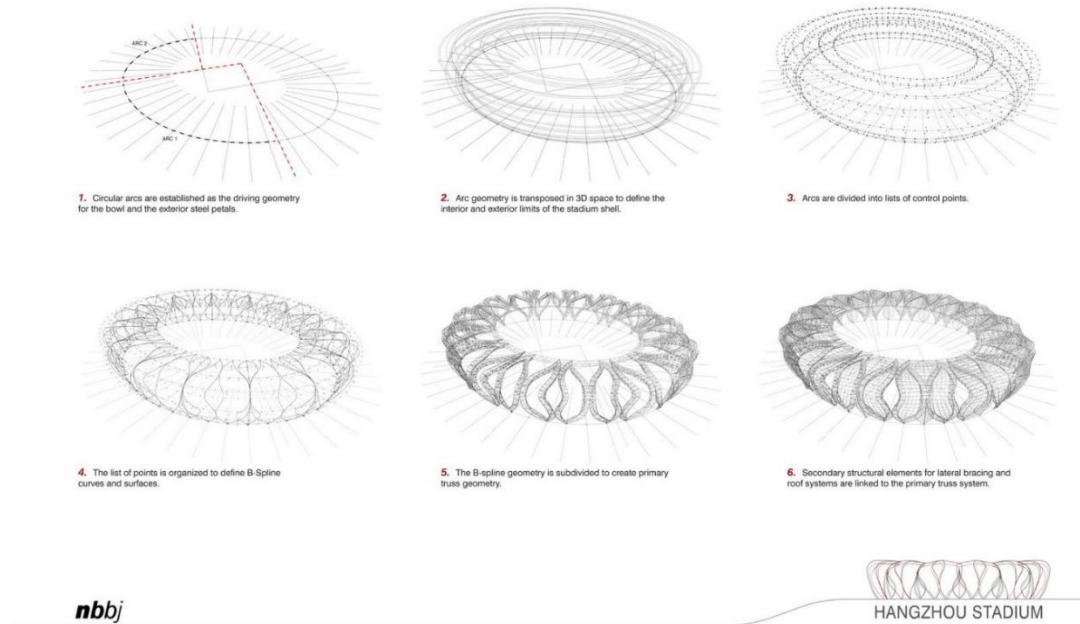


Figure 36 : Le processus de conception (la recherche formelle) du stade Hangzhou. Source : NNB

b- Générer des variations de forme :

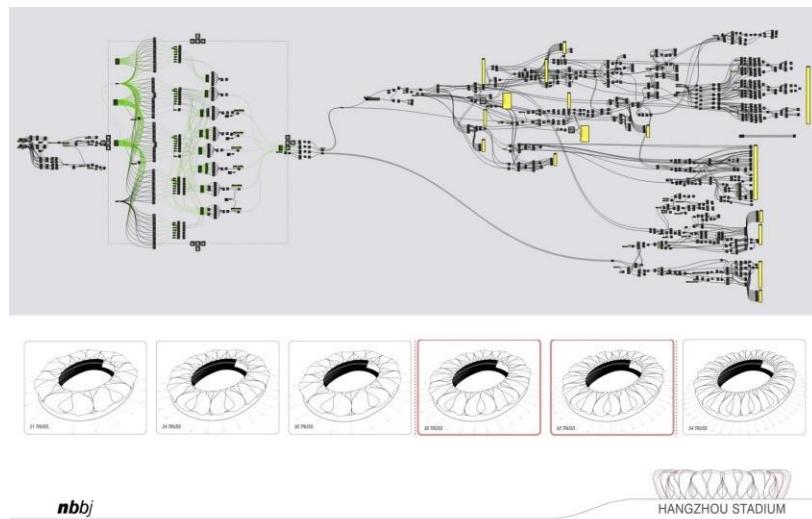


Figure 37 : Programmation paramétrique pour la génération des variantes. Source : Natan Miller

La définition de la géométrie de l'enveloppe a permis aux concepteurs de générer de nombreuses variantes. Le contrôle paramétrique des nuages de points était le principal moyen pour contrôler la forme. Les paramètres de manipulation des nuages de points (tri, transformation) ont permis à l'équipe de conception d'étudier les différentes configurations des surfaces extérieures. Les pétales résultants ont été évalués et comparés par l'équipe de conception selon les critères suivants : Esthétique, l'ombrage, drainage, et performance structurelle.

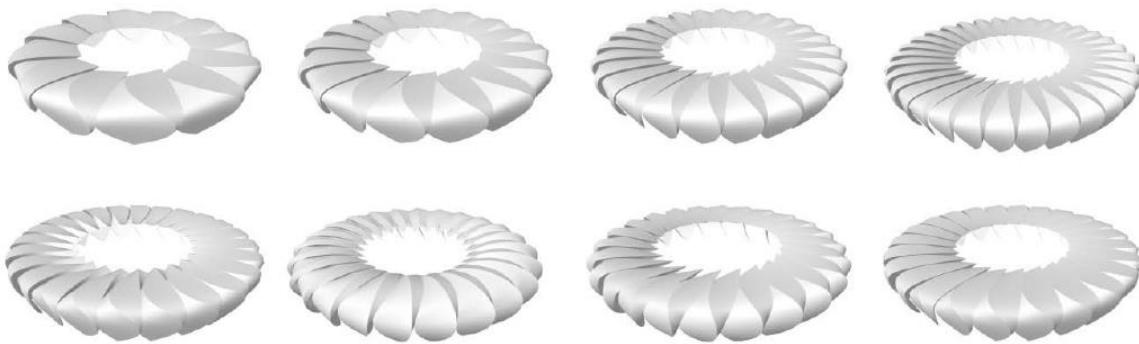


Figure 38 : Les variantes évaluées et comparées par l'équipe de conception. Source : Natan Miller

c- Contrôle et collaboration (structurel) :

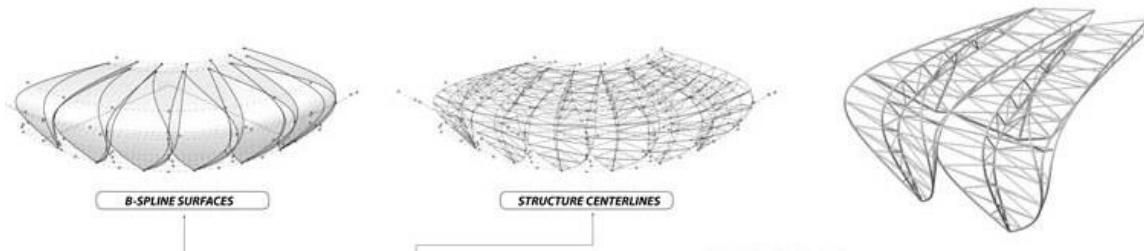


Figure 39 : La transformation des lignes de courbure en éléments structurels. Source : Natan Miller

Avec la complexité de l'enveloppe architecturale, il est devenu évident que les documentations classiques ; plan, coupe et élévation ne sont pas en mesure de décrire avec précision la géométrie extérieure de l'enveloppe du bâtiment afin de transmettre l'intention de conception aux intervenants.

Un programme paramétrique a été créé sur Grasshopper qui a permis à l'équipe NBBJ de produire de la documentation non graphique tel-que les diagrammes de surfaces et les nomenclatures décrivant avec précision les surfaces, les courbures et les bords des surfaces. Ces informations géométriques ont été utilisées directement par les ingénieurs en structure comme point de départ pour l'étude du comportement structurel et la fabrication. (Figure40)

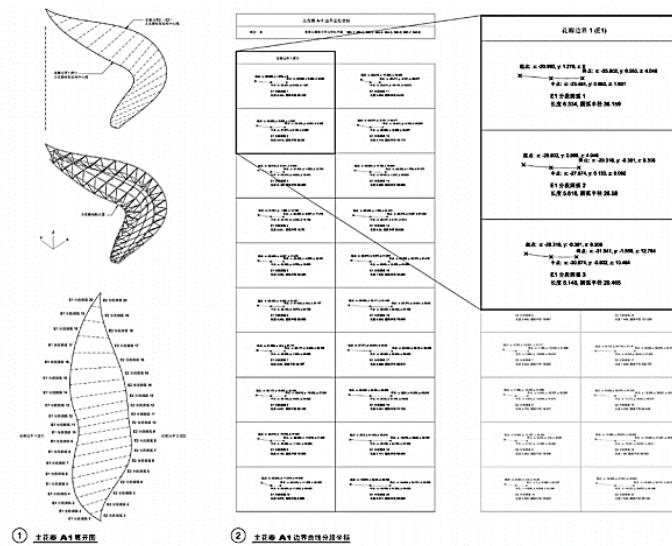


Figure 40 : Documentation à partir de Grasshopper. Source : Natan Miller

L'équipe de conception était dans l'obligation de générer un modèle prêt à l'analyse, pour être utilisé par les ingénieurs à partir de leur modèle paramétrique (variante sélectionnée) car le calendrier était raccourci et la coque extérieure était complexe.

Pour convertir les pétales en éléments de structure, l'équipe de conception était en étroite collaboration avec CCDI Company. À partir de la géométrie de la variante sélectionnée, les surfaces à double courbure des pétales ont été transformées en modèle de ligne centrale typique. L'équipe de conception NBBJ a développé un sous-programme personnalisé et attaché à l'algorithme paramétrique principal (de conception). Le but était de transformer la surface de l'enveloppe architecturale en segments de ligne individuels (pour les tubes structuraux) et points de noeud (pour les connexions), ce modèle a été produit sur Grasshopper est applicable pour les logiciels de conception et simulation structurelle. Les paramètres ont été établis pour contrôler l'espacement des éléments structuraux.

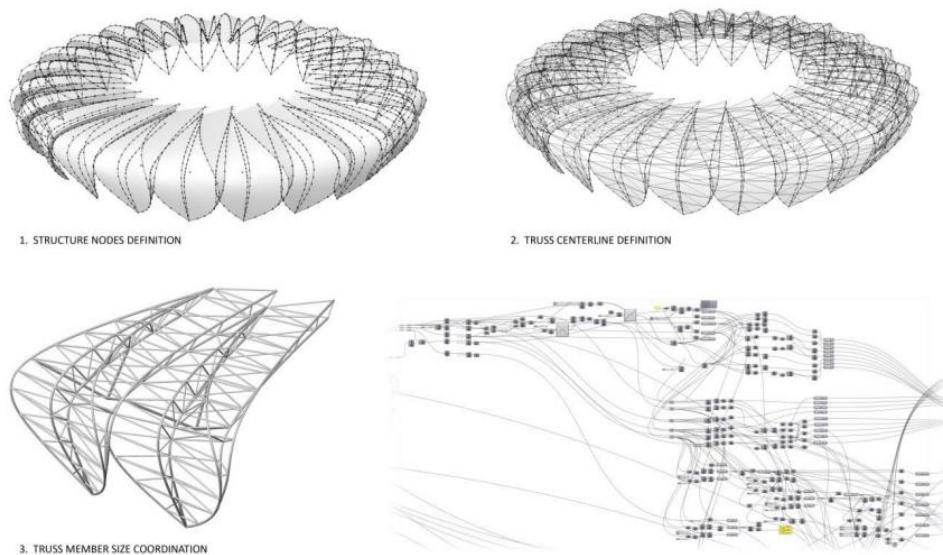


Figure 41 : Modèle généré sur GH prêt pour l'analyse structurelle. Source : Natan Miller

Remarque : cette étape a permis aux ingénieurs d'éliminer le délai de reconstitution d'un modèle spécifique pour les calculs et la simulation.

d- Simulation :

Après avoir effectué une analyse de la variante sélectionnée afin de concevoir les systèmes structuraux, une opération supplémentaire a été ajoutée dans l'algorithme Grasshopper.

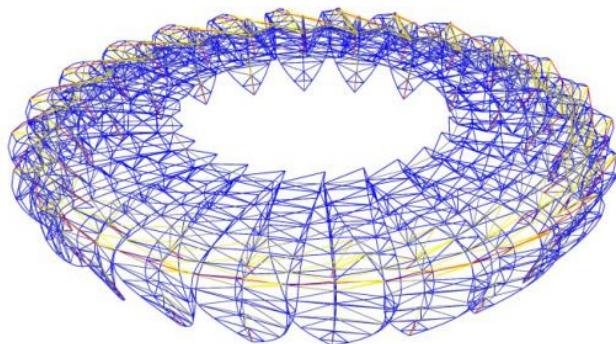


Figure 42 : l'utilisation de Kangaroo pour la visualisation de la charge de gravité sur le modèle
Source : Natan Miller

Le plugin Kangaroo combiné avec un script de visualisation a été utilisé pour fournir un affichage de la façon dont les forces se déplaçaient à travers la structure. Les forces de traction et de compression pouvaient être visualisées en plus des zones de contrainte maximales. Ce qui a permis à l'équipe de conception de prendre des décisions plus éclairées et d'effectuer des ajustements structurels sur les fermes. Différents tests ont été effectués par les ingénieurs structure afin d'identifier les problèmes et extraire les informations relatives aux dimensionnements des éléments porteurs.

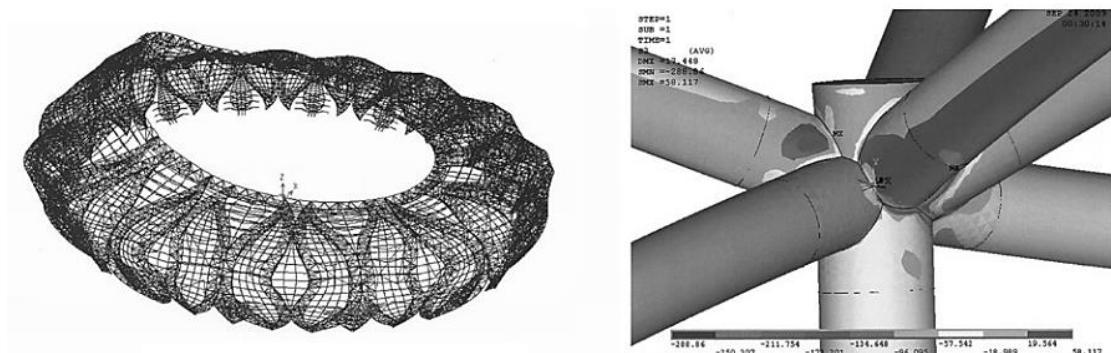


Figure 43 : l'analyse structurelle effectuée par CCDI. Source : Natan Miller

Le retour d'information a permis à la structure en acier d'être optimisée pour réduire la consommation d'acier par rapport à des stades de taille et de complexité similaires.

e- Analyse de l'enveloppe (surface et revêtement)

L'analyse de la surface de l'enveloppe était intégrée par un algorithme développé sur Grasshopper, cela avait pour but de visualiser les zones de courbures de la géométrie et de faciliter le processus de calcul du nombre de panneaux d'aluminium pour procéder à la fabrication et l'installation avec précision.

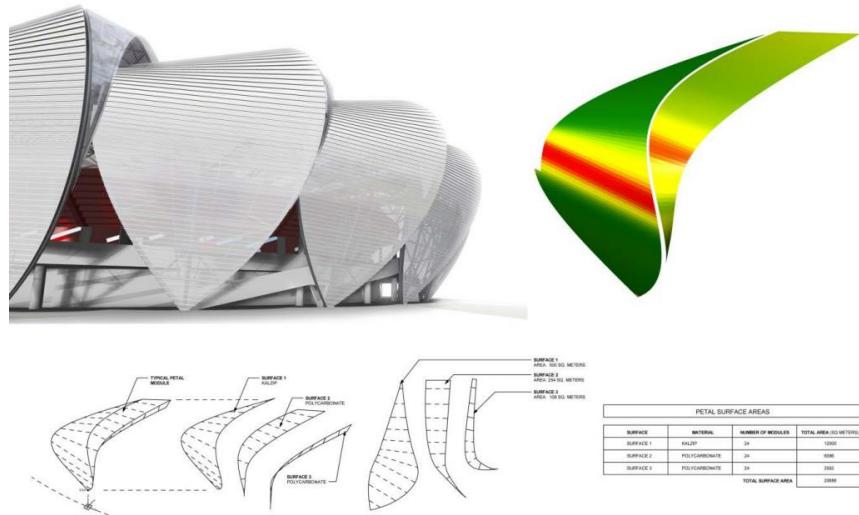


Figure44 : étude de planéité de la surface de l'enveloppe. Source : Natan Miller

La surface de l'enveloppe était subdivisée en plusieurs panneaux dont chaque panneau a fait l'objet d'un test de planéité. Le système de revêtement a été modélisé de manière paramétrique afin d'étudier avec précision l'aspect visuel des joints des panneaux, l'espacement et les rapports entre les points d'ancrage. Afin d'obtenir des géométries renseignées (nom, surfaces, emplacement, coordonnées ...) un autre logiciel métier a été utilisé : REVIT.

f- Coordination, partage d'information et documentation :

Pour la documentation et le renseignement de la géométrie, Grasshopper est utilisé non seulement comme un outil de développement géométrique et de conception structurelle mais également comme un outil qui a facilité la coordination avec les autres outils de documentation externes. Des programmes ont été développés pour l'exportation automatique des éléments du modèle vers un fichier DWG (en 3D et 2D) et la mise à jour automatique des fichiers convertis (interopérabilité) afin que les applications externes puissent utiliser les versions les plus récentes. Ce modèle paramétrique a été utilisé comme un modèle de base pour une collaboration interdisciplinaire. La communication étroite entre les disciplines a permis à l'équipe de conception d'assurer le contrôle de qualité et de trouver des opportunités d'optimisation.

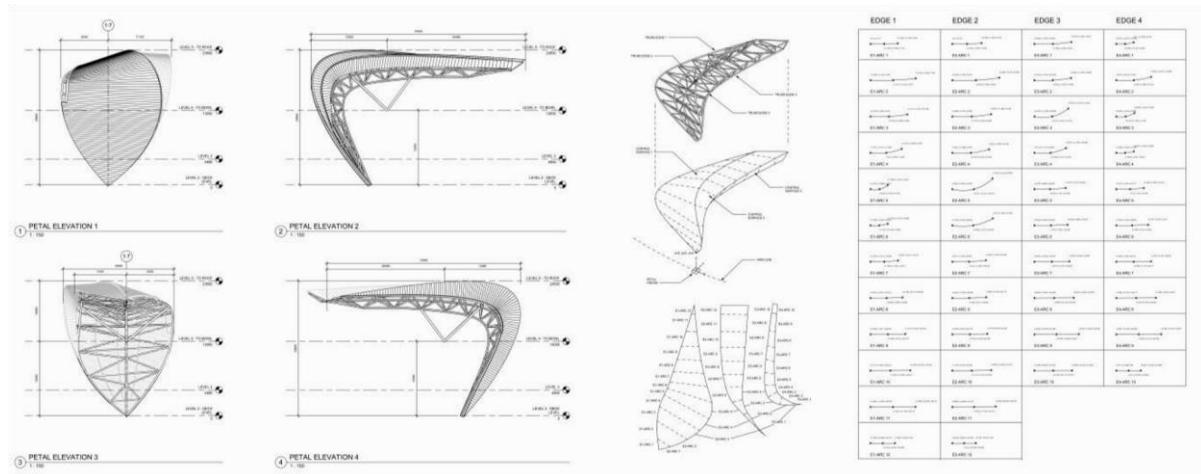


Figure 45 : Documentation graphique à partir du model 3D REVIT. Source : Natan Miller

Revit a été utilisé pour générer des feuilles de documentation contenant des dessins graphiques de la coque extérieure. De plus un algorithme a également été utilisé pour produire une géométrie descriptive 2D. Ces dessins étaient utilisés avec un tableau de nomenclature de quantitatif des surfaces. L'algorithme a produit ainsi une feuille de calcul qui contient des informations sur les courbures des surfaces. (Figure 45)

CONCLUSION :

Le succès de conception collaborative qui a réalisé l'équipe de NBBJ et CCDI était dû à l'élaboration d'un système de travail unique (personnalisé) et rigoureux. Ils avaient pour but de permettre l'efficacité de la communication et la fluidité du transfert d'informations entre les intervenants qui n'utilisaient pas forcément les mêmes logiciels. L'équipe de conception a mis en œuvre un processus de conception / flux de travail résultants de plusieurs expérimentations, développements et testes qui s'articulaient autours de l'import, l'export et l'échange de fichiers et des informations. Le flux de travail était personnalisé et non standard.

L'interopérabilité est l'élément clés du processus de conception de ce projet. L'un des plus grands défis de l'équipe fût de trouver des méthodes pour la coordination d'information provenant de différents logiciels de différents environnements (BIM-logiciel métier, modélisation paramétrique et analyse de structure). A ce titre, Nattan MILLER, l'un des participants à ce projet, avait déclaré « *L'interopérabilité présente un intérêt spécial pour moi depuis un certain temps. Quand j'étais designer chez NBBJ, il était très important de pouvoir utiliser différents outils de conception et d'analyse pour échanger les données et la géométrie. En 2010, j'ai eu la chance d'avoir publié un article dans le cadre de la conférence ACADIA intitulée « Expériences dans l'échange d'informations et les workflows collaboratifs». Dans cette article j'ai cité plusieurs solutions de flux de travail déployées sur le stade de Hangzhou, y compris l'utilisation des bases de données centralisées et de connexions API pour faciliter l'échange des données et de géométrie entre les outils Revit, Grasshopper et AutoCAD. Au moment du projet, il n'y avait pas de plugins spéciaux ou de workflows bien définis disponibles qui répondaient aux besoins du projet. De nombreux outils ont dû être développés à partir de zéro et étaient spécifiques aux critères de conception uniques du projet... »²⁹*

De plus un système de transmission et de coordination a été mis en œuvre afin de minimiser la redondance et la perte d'information. Des scripts personnalisés et des plugins ont été développés pour le transfert d'information tel-que les coordonnées (x, y, z) de chaque point, les surfaces et les vecteurs entre les logiciels. Il s'agissait d'échanger avec précision les données et le modèle 3D afin de rester fidèle à la forme de l'enveloppe architecturale conçu par l'architecte. Durant la phase de conception, on remarque que les architectes étaient en étroite collaboration avec d'autres corps de métier pour à la fois la génération de forme et sa validation.

Contrairement à la méthode d'autre fois (on conçoit une enveloppe pour des raisons uniquement architecturales, puis on voit quels systèmes on doit utiliser), ce processus consiste à rassembler plusieurs phases/étapes dans la phase de conception tel-que l'analyse de structure, l'étude de vent, de la gravité en allant jusqu'à la préparation des fichiers pour la fabrication des panneaux de l'enveloppe architecturale. Il s'agit d'une révolution des mentalités qui valorise le rôle central de la conception architecturale intégrée en collaboration avec l'ensemble des spécialistes nécessaires.

²⁹ <https://provingground.io/2016/06/21/the-wicked-problem-of-interoperability/> publier par Nattan Miller est le fondateur de PROVING GROUND

Malgré son efficacité, ce processus nécessite du temps pour la préparation de la géométrie (simplifier le modèle 3D en fonction de l'outil utilisé par l'intervenant qui va recevoir le fichier) avant de l'envoyer à l'intervenant, toute en respectant le protocole et la charte définie.

3.2. Cas d'étude N° 02 : le projet de l'Aréna 92

Introduction :

Le projet de l'Aréna 92 a été choisi comme cas d'étude, car la conception de son enveloppe architecturale est le résultat d'un ensemble de processus de conception menés par les architectes et d'autres intervenants opérations de conception ont été étroitement liées à la phase de fabrication. L'analyse de ce cas d'étude est faite suite à un entretien réalisé avec le *BET MBA ingénierie*³⁰. Dans ce cas d'étude on va voir pour quelle raison et de quelle façon le BIM a été déployé.

Mots clés: BIM, enveloppe architecturale, conception, fabrication, collaboration, interopérabilité.

3.2.1. Présentation du projet :

« *La U Aréna, anciennement Aréna 92, est une salle modulable et polyvalente (manifestations sportives, salle de spectacle) à Nanterre, juste derrière l'Arche de la Défense, inaugurée le 16 octobre 2017. Plus grande salle d'Europe avec une capacité maximum avoisinant les 40 000 places pour les concerts, elle sera le stade résident du Racing 92. Elle accueillera les épreuves de gymnastique des Jeux olympiques de Paris 2024.* »³¹

Le Maître d'Ouvrage a attribué la réalisation du projet à un groupement de conception / construction dont Vinci GTM Bâtiment est le mandataire et le cabinet d'architectes de Portzamparc, l'associé principal.

L'appel d'offres a été remporté grâce à un concept architectural ambitieux dont le principal fer de lance est la façade extérieure. Les coques béton participent pleinement à l'esthétique de cette enveloppe architecturale et l'ensemble des partenaires était dans l'obligation de respecter les principes qui ont guidé la conception (géométrie, état de surface).



Figure 46 : Vue 3D depuis l'accès central de l'Aréna 92

³⁰ MBA-Ingénierie est un bureau d'études techniques, de synthèse TCE BIM et BIM management. Le BET fait souvent des études d'optimisation et d'exécution des enveloppes à géométries complexes.

³¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/U_Arena

3.2.2. Descriptif de l'ouvrage et objectifs :

Les coques préfabriquées en béton sont générées en géométries complexes (courbées dans les deux sens), c'est pour cela les architectes ont choisi de les concevoir sur Rhinocéros qui est un logiciel assez puissant pour le traitement des surfaces courbées.

Sur la partie stade, les coques sont disposées, en général, tous les 5.25m en partie droite et de manière variable dans les virages.

Le profil type de la génératrice des coques est composé de 3 segments droits et deux segments en arc de rayons constants 2.9m. Les longueurs d'arcs et longueurs droites étant variables. (Figure 46)

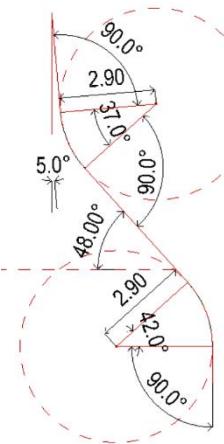


Figure 46 : Profil type des CQB. Source : MBA ingénierie

Les coques comme dessinées aux toutes premières phases par les architectes en modèle 3D sous Rhinocéros représentaient que l'état vue de l'extérieur en surfacique continue.

Les architectes ont développé leurs études sous Autocad pour les livrables 2D et Rhinoceros 3D pour la maquette 3D. L'objectif après ces études préliminaires c'était de développer les études de conception et d'exécution des éléments ci-après :

- Découpages des coques (vrais joints et faux joints) et optimisation de la forme afin d'obtenir un nombre réduit des moules (pour la fabrication);
- Interface des CQB (Coque Béton) avec les autres composants du projet (chéneau en haut et la dalle avec les grilles de ventilation en bas) ;
- Définition des systèmes de fixation et de réglage des panneaux ;
- Charpente métallique et support ;
- Méthodes et phasage de pose.

3.2.3. Processus de conception et flux du travail :

Vue la complexité du lot en conception, fabrication et montage Vinci GTM Bâtiments et les architectes ont jugés préférable de traiter l'ouvrage en BIM. Une cellule de BIM management a été engagée pour maître en place un processus d'échange et de suivi des

modèles 3D, la cellule est MBA-Ingénierie, qui avait aussi la mission de synthèse tout corps d'état (TCE) en 2D et BIM et études des coques béton.

Les intervenants concernés par les coques béton étaient obligés de suivre une convention BIM qui leur a été transmise et de développer leurs études en 3D.

Cette phase d'étude peut se résumer en 6 phases :

- 1- La réception de la forme géométrique pour l'analyse et optimisation ;
- 2- La validation de la géométrie optimisée par l'architecte (phase riche en échange) ;
- 3- L'intégration de la nouvelle coque dans la maquette globale ;
- 4- Transmission des modifications aux bureaux d'études concernant la structure métallique ;
- 5- Réception des mises à jour ;
- 6- Validation globale.

Divers logiciels ont été utilisés, tels que Rhinocéros 3D, Revit 3D et Tekla structure. Grâce à l'interopérabilité, des allers retours étaient assurés entre ces logiciels dans le but de faciliter les échanges et d'éviter les erreurs de la ressaisie.

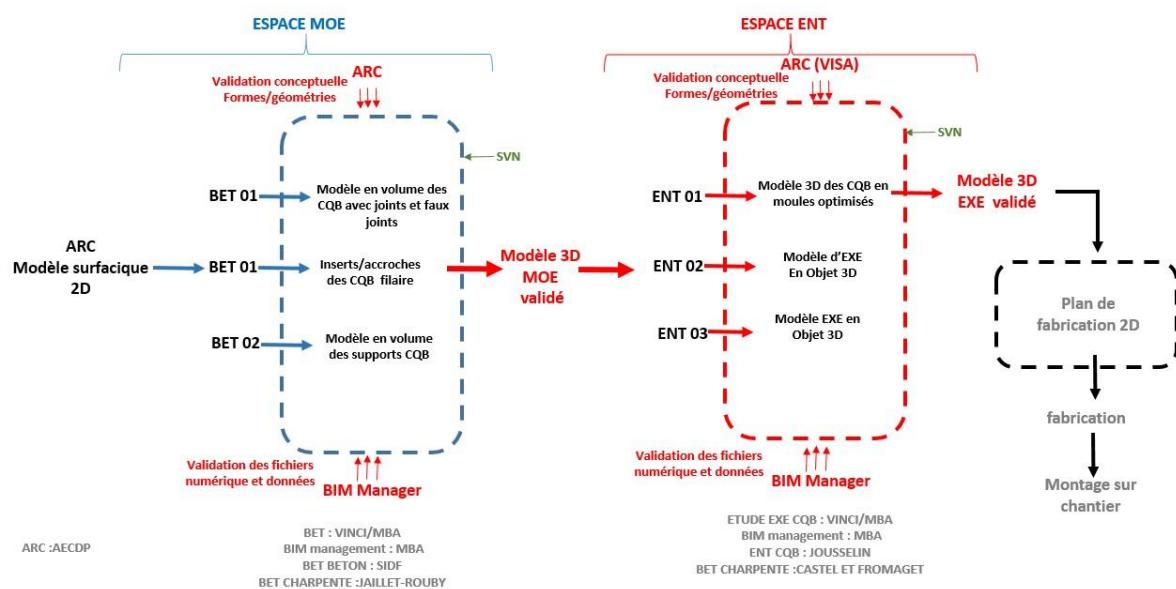


Figure 47 : Organigramme de production et d'échanges des modèles numériques 3D des coques béton

L'organigramme ci-dessus nous montre le processus BIM en conception et échanges des modèles 3D ainsi que les rôles des différents intervenants qui se présentent comme suite ;

Les architectes : les architectes AECDPortzamparc ont constitué leur modèle 3D du projet avec les coques béton sur Rhinoceros 3D, ce dernier a été généré en surface continue et **non pas fragmentée**.

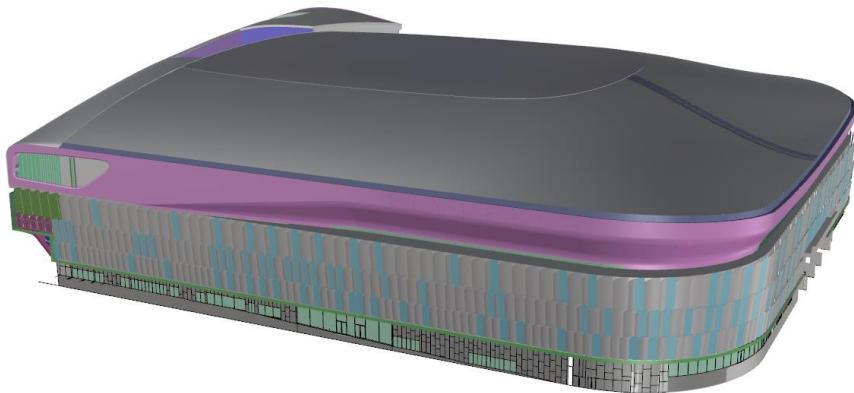


Figure 48: Modèle 3D des architectes réalisé sur Rhinocéros

Source : MBA ingénierie

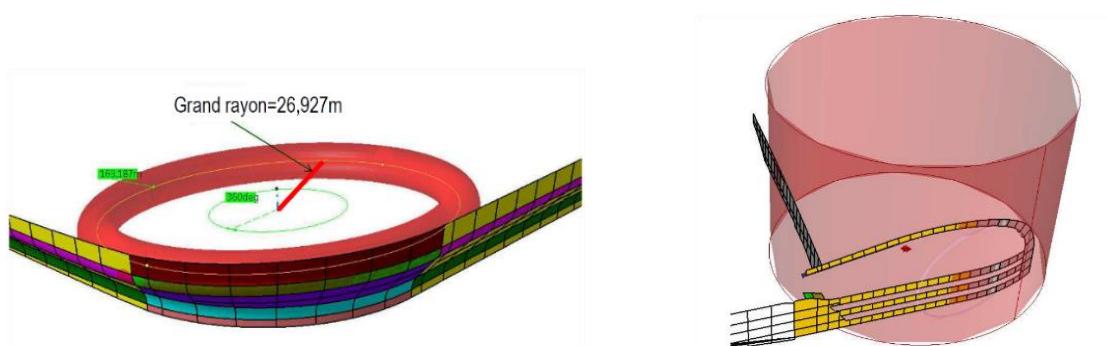


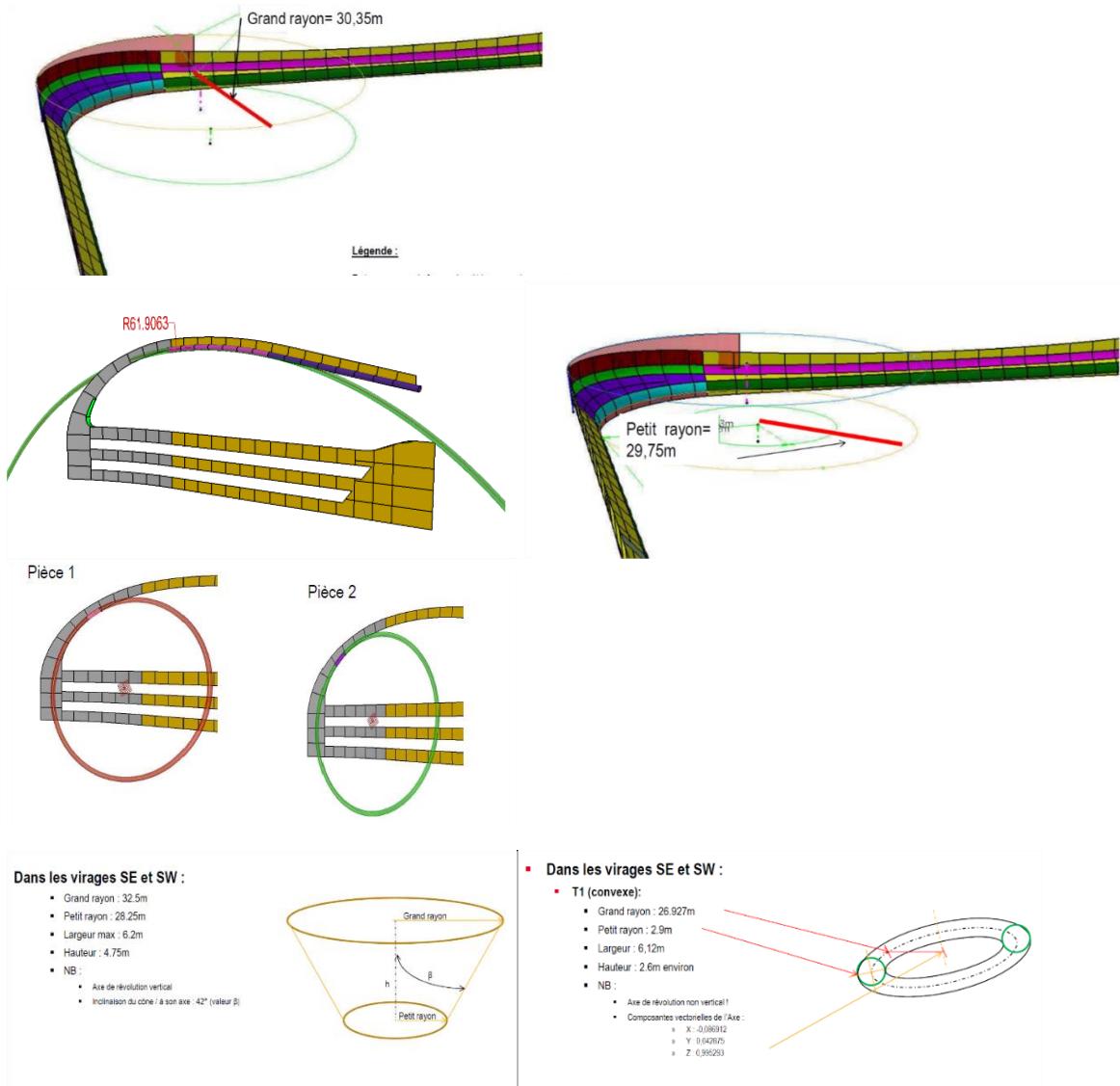
Figure 49: Modèle 3D des CQB en surface continue (surface de REF)

Source : MBA ingénierie

Espace MOE : c'est l'espace des intervenants de la maîtrise d'œuvre, ce sont les bureaux d'études qui étaient impliqués dans les études des coques béton, on y trouve ;

MBA ingénierie : le BET qui était en charge de développer les coques béton en volume tout en décomposant la surface continue des architectes pour créer les panneaux coques. Afin de décomposer la surface en panneaux, il fallait travailler sur l'optimisation de la surface dans le but de produire le minimum de moule pour la fabrication.





Figures 50: modélés optimisés à partir du modèle AECDP en se servant de Rhino et GH
Source : MBA ingénierie

Le BET a introduit des modifications au niveau des coques béton afin de minimiser les types (formes) des panneaux à fabriquer pour réduire le nombre des moules. A partir de cette opération, le nombre des moules était fixé à 27 pour 654 panneaux de coques, décomposés comme suite :

- **345** plans (53%)
- **197** cylindriques (30%), avec 5 rayons différents : **2.9m** (126u dans les trames courantes, la moitié convexe, l'autre concave), **27.45m** (16u dans les virages), **0.4m** (26u dans les chants des oculi), **36.12m** (28u en partie Nord de l'oculus Est), **6.23m** (1u dans la vague de l'oculus Est)
- **47** toriques (7%), avec 5 types différents : 32u dans les trames courantes des virages, la moitié concave, l'autre convexe, 15u reparties en 4 types pour les chants des oculi.
- **42** coniques (6.5%),
- **23** spéciaux (3.5%), dont 16 surfaces développables, 4 composées, 3 non développables



Figure 51 : Nomenclature des différents moules en utilisant le code couleur pour chaque type de moule Source : MBA ingénierie

Le bureau d'étude structure (Jaillet-Rouby) s'est servis du modèle volumique des coques optimisé et exporté en IFC pour développer ses supports coques sur Tekla structure.

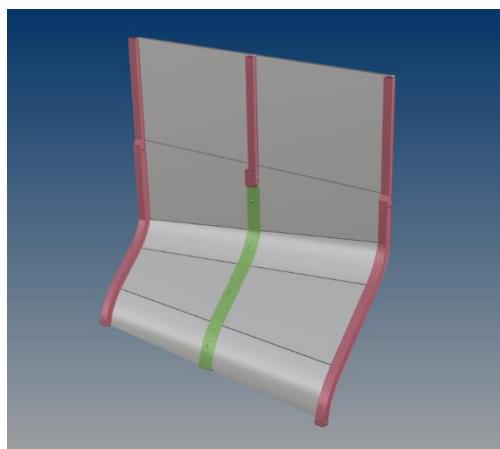


Figure 52 : Supports métalliques des coques béton. Source : MBA ingénierie

Espace ENT :

C'est l'espace des entreprises qui ont travaillé sur les coques béton et leurs supports. Dans cette phase les formes des coques étaient définies, il restait à définir les inserts où les attaches, ces derniers avaient une certaine logique de positionnement, et cela par rapport à la taille et la forme de chaque coque. En cela, MBA a développé un programme paramétrique sur Rhino-Grasshopper afin de développer tous les points d'attaches pour chaque coque en points et lignes qui étaient nécessaires pour savoir positionner les attaches et les orienter.

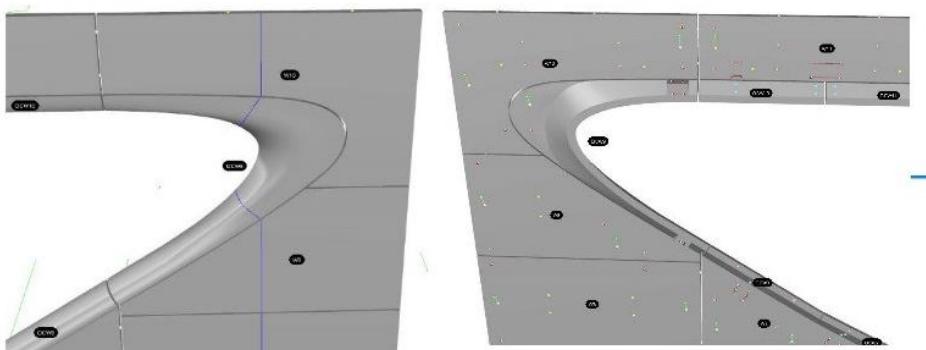


Figure 53 : modèle 3D avec les points d'ancre. Source : MBA ingénierie

L'entreprise de la charpente métallique (CASTEL ET FROMAGET) avait récupéré les points et lignes en dwg ainsi que leurs coordonnées pour développer en 3D sous Tekla structure les inserts ainsi qu'augmentation du niveau développement 3D des supports coques afin de passer à la fabrication par la suite.

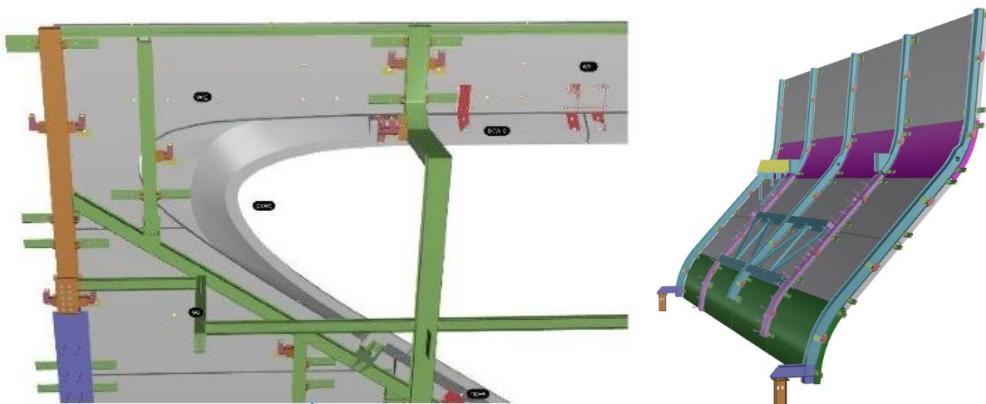


Figure 54 : développement 3D avancé des supports coque béton. Source : MBA ingénierie

Remarque :

Les architectes en phase de conception et exécution, leur modèle 3D de référence leur servait de contrôle, à chaque phase de développement des coques par les BET ou entreprises, ils superposaient leur modèle 3D avec celui des autres afin de vérifier la conformité et qu'ils ne dépassent pas un écart maximal de 11 cm après manipulation de la surface Ref de départ.

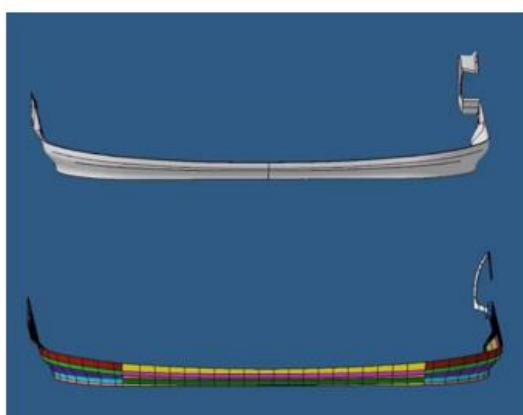


Figure 55 : en haut la surface de REF, en bas les coques générées

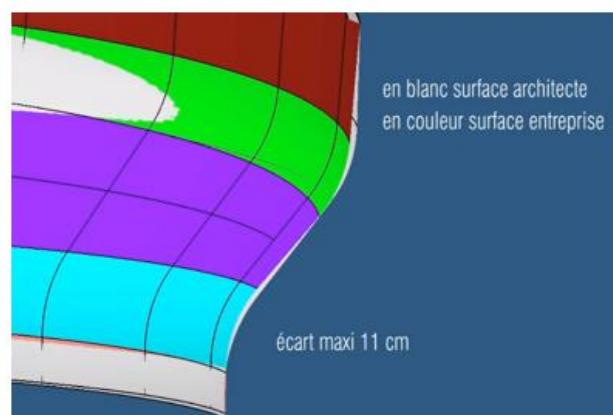


Figure 56: la superposition des deux modèles
Source : MBA ingénierie

La fabrication :

Pour la fabrication des coques béton, l'entreprise Jousselin avait généré les plans de fabrication des coques en automatique via Grasshopper de Rhinocéros en récupérant le modèle 3D des coques et les inserts.

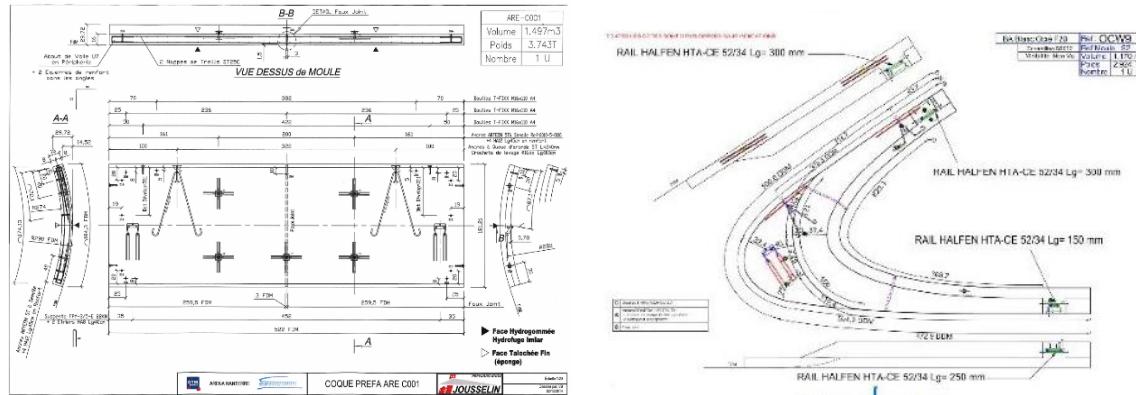


Figure 57: plan de FAB de coques générées automatiquement. Source : MBA ingénierie

La maquette numérique des coques béton a même servi pour le montage sur site, en mettant sur place une méthodologie de pose sous forme de dessin graphique 3D renseigné et des tableaux de nomenclature.

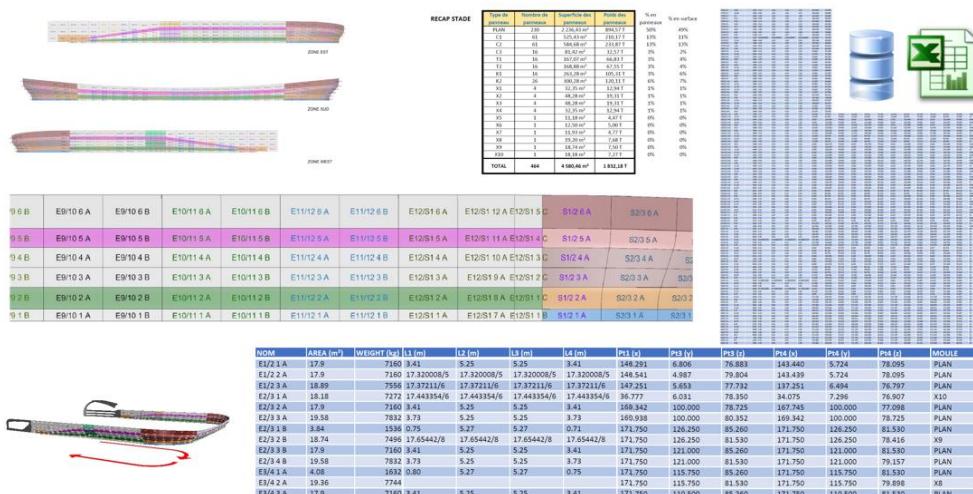


Figure 58 : Nomenclature suivant la méthodologie de pose. Source : MBA ingénierie



Figure 58 : fabrication et installation des panneaux. Source : MBA ingénierie

CONCLUSION :

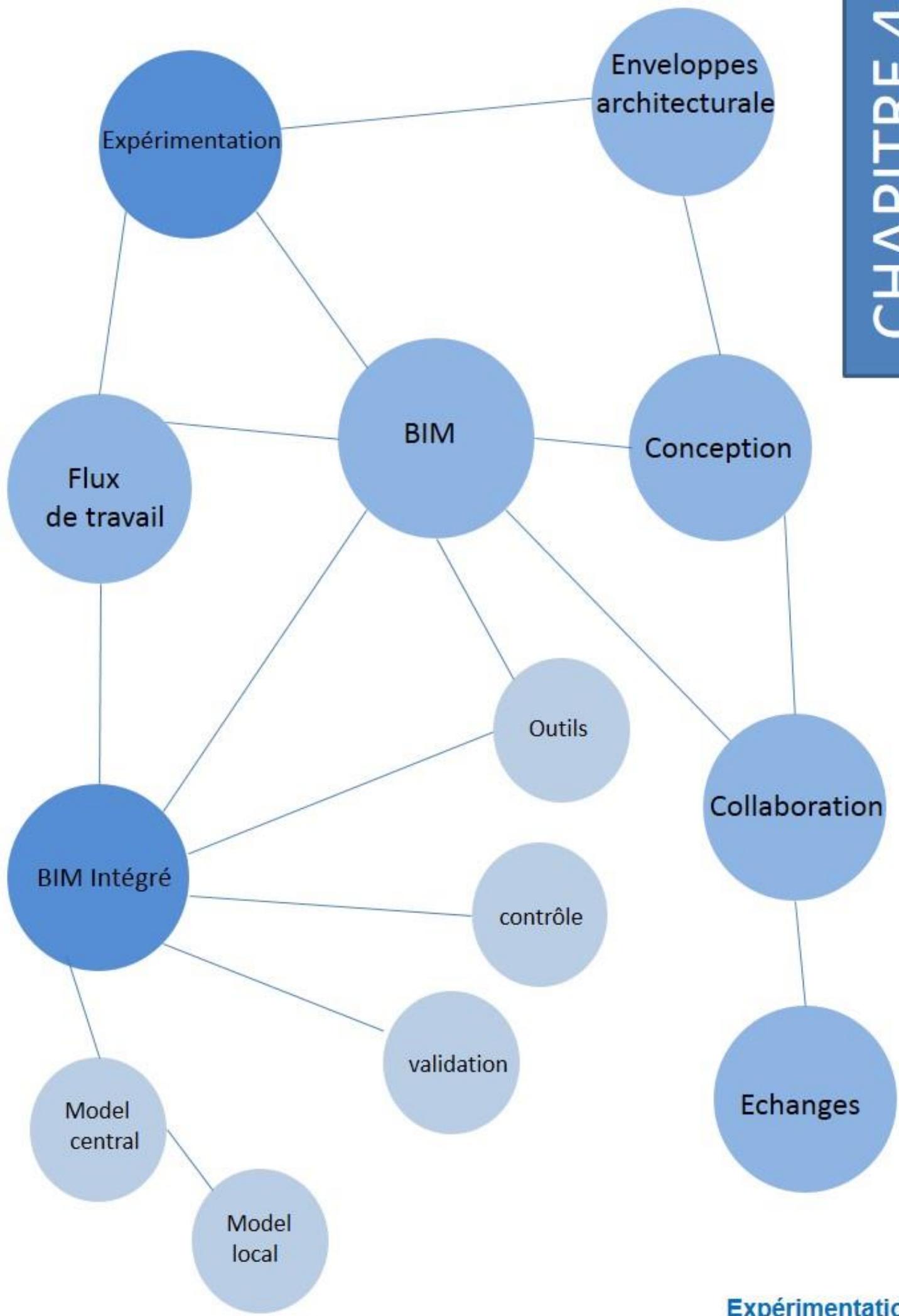
Le flux de travail mis en place, a permis à tous les intervenants de pouvoir signaler aux architectes les modifications effectuées par eux-mêmes en fonction des contraintes structurelles et techniques, aussi d'indiquer aux intervenants les limites de modification et les tolérances (11 cm) liées à la forme des coques.

Dans ce cas d'étude, le déploiement du BIM était nécessaire pour le développement de la conception de l'enveloppe architecturale qui n'était pas limitée uniquement à la recherche formelle. L'enveloppe architecturale ou précisément les coques béton, elles ont été optimisées et modifiées par les intervenants comme suivant :

- La forme CQB (Coque béton) a été modifiée avec une marge de tolérance de plus ou moins 11 cm dans le but de minimiser les types de moules pour la fabrication des panneaux.

De plus, sur le modèle 3D développé par les architectes les coques béton étaient en surface continue, pour des raisons de faisabilité, les intervenants chargés de développer les études de l'enveloppe ont subdivisé les coques béton en plusieurs panneaux en intégrant des joints et des faux joints.

Pour conclure, le processus BIM (l'interopérabilité, partage des données) a permis la modification de la forme géométrique des coques béton toute en restant en étroite collaboration avec l'architecte principale pour le contrôle et la validation de la forme résultante.



INTRODUCTION :

Après avoir analysé les deux cas d'études, il m'a semblé nécessaire de faire une expérimentation afin de vérifier quelques éléments qui n'ont pas été traités/cités, car dans les deux cas d'études le sujet ou le caractère principal (du processus BIM) évoqué est celui de l'interopérabilité. Des plugins et des workflows ont été testés et développés afin d'assurer une meilleure collaboration entre les intervenants (conception collaborative, échange, partage des données). Dans le 1er cas d'étude, le stade de Hangzhou illustre la collaboration étroite entre l'architecte et l'ingénieur dans le but de générer et valider la forme de l'enveloppe architecturale. Dans le 2eme cas d'étude, la forme de l'enveloppe architecturale de l'Aréna 92 a été définie par l'architecte principale, en suite, le processus BIM a été intégré pour l'échange, le partage et le travail collaboratif, en assurant ainsi la continuité des études par d'autres intervenants. L'expérimentation évoque une approche différente, qui est celle du BIM niveau 3, à savoir le travail en BIM intégré, c'est-à-dire développer les études par divers intervenants autour d'une maquette numérique (modèle 3D central-modèle 3D local). Cette expérimentation est réalisée par l'auteur du mémoire (Sarra BENSAHA), en supposant qu'il y a 4 intervenants qui travaillent en étroite collaboration (co-conception) autours d'une seule maquette numérique (un seul fichier central).

4. EXPERIMENTATION :

4.1. Contexte et Objectif de l'expérimentation :

Dans une démarche collaborative autour d'une maquette numérique, la conception de l'enveloppe architecturale fera l'objet de cette expérimentation. Avec la collaboration de 4 intervenants (imaginés par l'auteur du mémoire), il est possible de lier à cette source plusieurs informations et documents des différents lots. La maquette n'est donc pas seulement une source d'information mais un moyen qui peut garantir la cohérence du développement du processus de conception.

Cette expérimentation a pour but de vérifier ce que le BIM peut apporter à la conception de l'enveloppe architecturale. A travers cet exercice, on va voir si le BIM (travail collaboratif autour d'une maquette numérique) peut assurer les points suivants:

- La cohérence entre les différents intervenants ;
- L'étude des formes qui représentent une certaine complexité ;
- Le suivi et le contrôle (par l'architecte principal) ;
- L'échange entre les différents intervenants.

Comme chaque projet élaboré avec le processus BIM, avant toute intervention, la mise en place d'une charte/workflow est nécessaire pour définir les rôles et les limites d'intervention de chaque intervenant, les outils et le protocole d'échange à mettre en place...etc.

4.2. Protocole et organisation de la maquette numérique :

Dans le cadre de cette expérimentation, notamment par la présence de plusieurs intervenants, une réflexion sur la mise en place du processus a été décrite en protocole et organisation.

4.2.1. Le protocole collaboratif :

L'ensemble des intervenants s'entendent sur le fait que le logiciel Revit 2016 et son plugin Dynamo 1.2 sont la solution de modélisation commune. Les fichiers seront stockés dans un serveur central dans le cas d'une collaboration interne, ou dans la plateforme d'échange Drop-box. Cela permet aux intervenants de s'y connecter afin d'alimenter ou exploiter les données déjà stockées.

Les fichiers hébergés dans la plateforme sont partagés en trois modèles (figure 60) selon l'état d'avancement du travail (la mission), représentés comme suite :

- REF: un dossier de référence dans lequel on trouve des informations sur la localisation, la surface, les niveaux et toutes les informations nécessaires pour la conception.
- WIP (Work in progress) : ce dossier contient le travail de tous les intervenants et la maquette numérique en cours de développement.
- MAS (fichier master) : ce dossier contient le travail validé. Il marque la fin de validation de chaque phase.

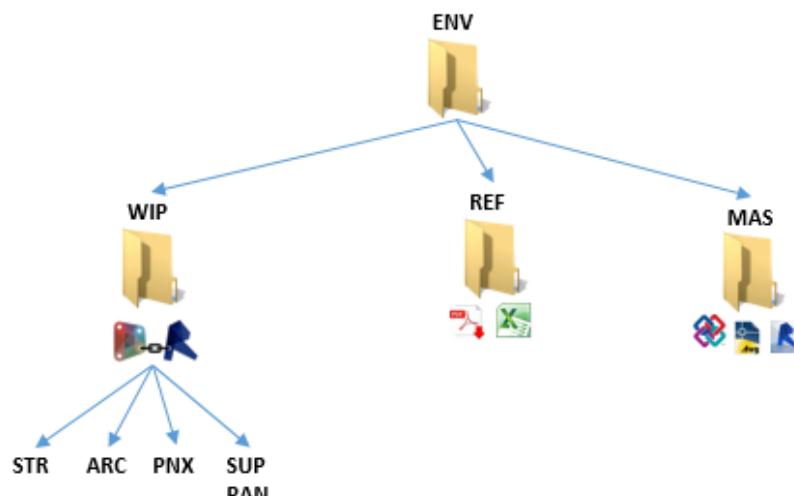


Figure 60 : Base de données et fichiers partagés. Source : l'auteur du mémoire

4.2.2. La géométrie et la qualité de la modélisation:

Les intervenants doivent assurer que les qualités des surfaces sont mises en œuvre comme décrites ci-dessous :

- Aucun élément ne doit être modélisé en rouge (cette couleur est réservée pour la détection des interférences entre les différents modèles 3D).
- Aucun élément déposé dans les dossiers partagés ne doit contenir des éléments cachés ou en transparence à l'exception des éléments vitrés

- Tous les modèles 3D Revit déposés dans le serveur ne doivent comporter que les composants 3D

Unités :

L'unité du modèle 3D est le mettre.

Précision minimale du modèle pendant la modélisation : 0.00

Précision minimale d'affichage pendant la modélisation : 0.00

4.3. Fonctionnement des échanges des fichiers numériques:

4.3.1. Principes et flux de travail :

La mise en place d'un flux de travail est nécessaire pour le développement de la maquette numérique. Il identifie les activités/missions successives ou parallèles qui sont à mener et les objectifs à atteindre. La maquette numérique et le logiciel métier sont les éléments clés pour l'intégration des différents intervenants dans le projet.

Avant d'entamer la conception de l'enveloppe, on doit tout d'abord commencer par la création d'un fichier central et d'un fichier local pour chaque intervenant.

- Intervenant 01 : modèle 3D structure béton
- Intervenant 02 : modèle 3D surface de référence
- Intervenant 03 : modèle 3D panneaux de façade
- Intervenant 04 : modèle 3D support panneaux de façade

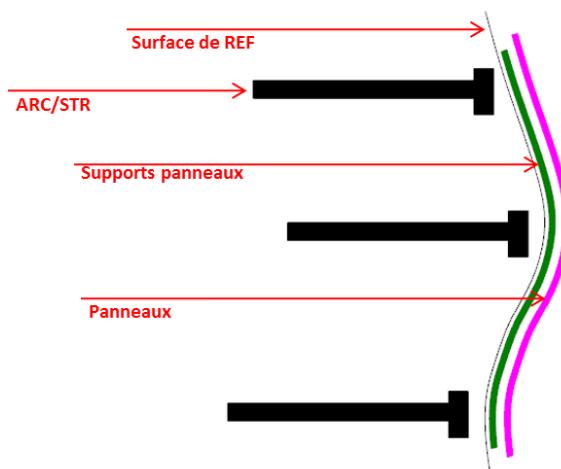


Figure 61- : Décomposition des lots de l'enveloppe par rapport aux intervenants.

Source : l'auteur du mémoire

Ensuite, à partir du modèle conçu par l'intervenant 1 (structure béton du bâtiment), la surface de référence sera générée par l'intervenant 2. Cette forme fera l'objet d'un élément de base sur laquelle l'intervenant 3 va s'appuyer pour la conception des panneaux de façade. Après avoir validé les panneaux de façade (formes et nombres), l'intervenant 4 peut construire son modèle 3D des supports panneaux de façade en fonction du nombre, de la taille et de disposition des panneaux. De plus, l'intervenant 3 et l'intervenant 4 doivent renseigner leurs géométries selon le besoin en fabrication, montage et installation.

Pour la synthèse, le travail de chaque intervenant chargé dans la maquette numérique doit être vérifié dans un logiciel de coordination et d'analyse pour la détection des interférences. Si la maquette numérique ne représente aucune anomalie, le travail sera validé et transmis pour la fabrication, dans le cas contraire le modèle 3D sera renvoyé à l'équipe dans lequel les problèmes détectés seront indiqués.

4.3.2. Synchronisation et échanges des modèles 3D :

Afin de travailler à plusieurs intervenants et en même temps sur un seul modèle 3D, le logiciel Revit offre la possibilité de créer et de partager des fichiers, cette fonction est la solution qui permet de :

- travailler en groupe.
- Gérer les éléments de construction : cette option nous permet de gérer la visualisation, le graphisme et la possibilité d'introduire des modifications par d'autres intervenants.
- Partage des fichiers : cette fonction offre la possibilité de travailler à plusieurs intervenants en même temps et dans le même projet.

La création des fichiers partagés : fichier central et fichier local

Avant la création des fichiers partagés, il est important de noté que le fichier central doit être mis dans le disque dure C afin d'assurer le partage et la synchronisation, dans le cas contraire, le fichier central ne peut être mis à jour, ni synchronisé par les intervenants.

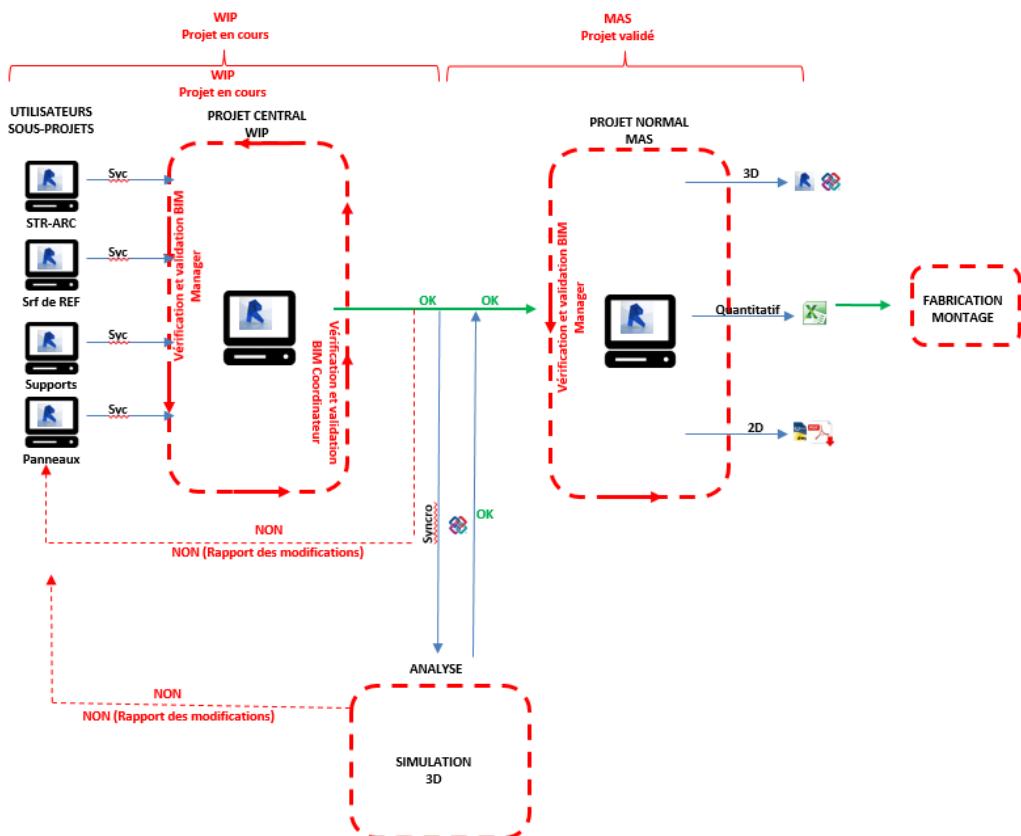


Figure 62 : Principe de Fonctionnement. Source : auteur l'auteur du mémoire

La création de fichier local :

Le fichier local est fait à partir d'un fichier central (Figure 63). Pour créer le fichier local, il faut tout d'abord que chaque intervenant mette un nom d'utilisateur qui correspond au nom de chaque sous projet. Le découpage de la maquette numérique est fait en fonction des utilisateurs :

- Intervenant 01 : modèle 3D structure béton
- Intervenant 02 : modèle 3D surface de référence
- Intervenant 03 : modèle 3D panneaux de façade
- Intervenant 04 : modèle 3D supports panneaux de façade

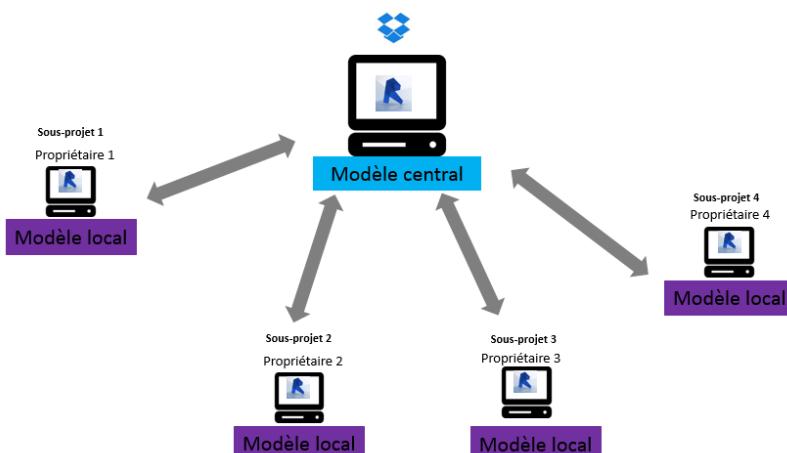


Figure 63 : Modèle 3D central et modèle 3D local du BIM intégré. Source : l'auteur du mémoire

4.4. Méthodes et processus de conception :

4.4.1. La conception de la surface de référence :

Dans un environnement BIM, on a conçu la forme de l'enveloppe architecturale à partir d'un modèle 3D structure en béton. L'intervenant 01 a modélisé la structure en béton du bâtiment, qui est considérée comme l'élément de base de la conception. Avant l'ouverture du fichier local, il doit assurer que son nom est indiqué dans le nom d'utilisateur.

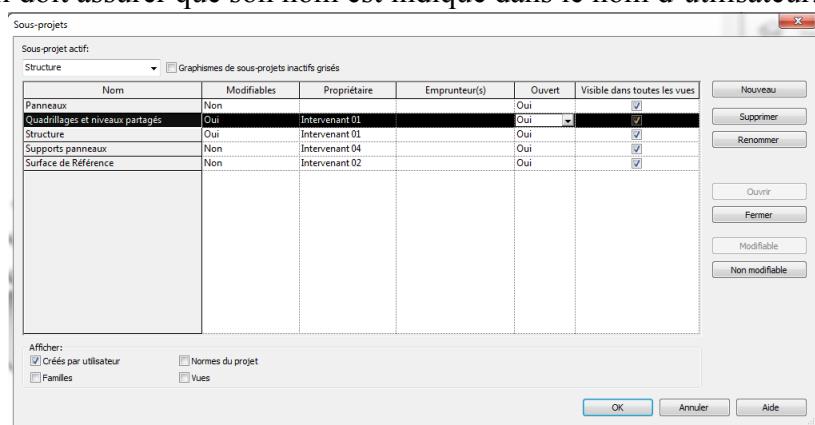


Figure 64 : l'ouverture du fichier local de l'intervenant 1 sur Revit. Source : l'auteur du mémoire

L'intervenant 01 à la possibilité de gérer le partage de son modèle 3D et designer les intervenants qui peuvent introduire des modifications dans sa partie du projet.

Après avoir modélisé la structure de la façade (bâtiment), l'utilisateur doit synchroniser son modèle 3D afin qu'il puisse être chargé dans le modèle 3D central et récupéré par les autres intervenants.

1. Conception paramétrique :

Afin de construire la surface de référence, l'intervenant 02 introduit le modèle 3D structure béton dans le plugin dynamo pour récupérer les lignes périphériques des dalles. Les lignes coté façade ont été sélectionnées et subdivisées.

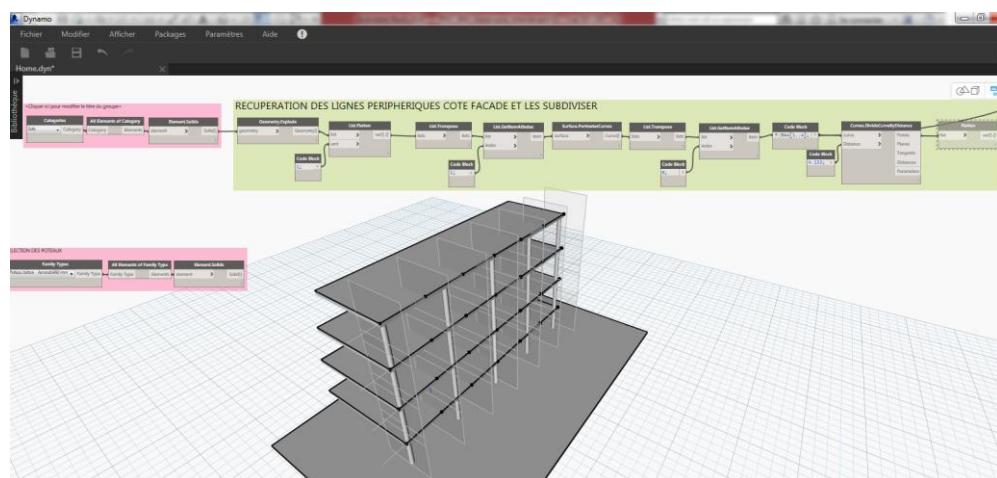


Figure 65 : sélection et subdivision des limites (lignes) des dalles coté façade. Source : auteur

L'étape qui suit est d'identifier les points générés à partir de la subdivision afin de les translater d'une manière aléatoire. L'intervenant 2 construit des courbes qui relient les points translatés, en suite à partir de ces courbes il génère une surface dite la surface de REF.

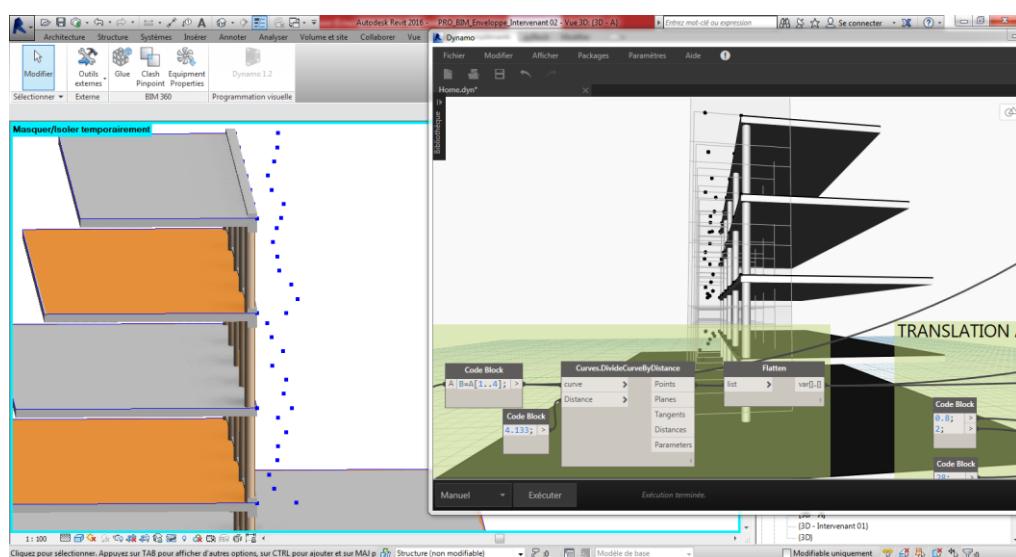


Figure 66 : translation aléatoire des points. Source : auteur.

La conception paramétrique sur dynamo donne la possibilité à l'architecte de générer plusieurs variantes par la modification de deux variables :

- 1- Nombre de la subdivision des lignes en points
- 2- La translation des points générés

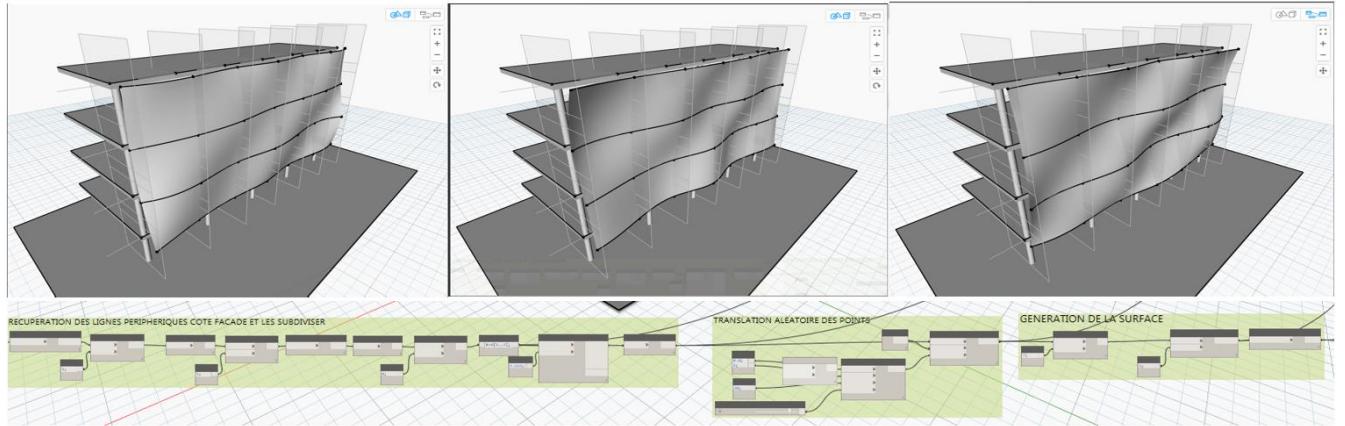


Figure 67 : les variantes des surfaces générées à partir des points translatés. Source : auteur

2. L'échange des données :

L'intervenant 2 échange son travail avec toute l'équipe, sa conception faite sur Dynamo est importée automatiquement sur son modèle 3D local, qui sera par la suite synchronisé et chargé dans le modèle 3D central. Lui seul a la possibilité d'apporter des modifications dans son script, par contre il donne la possibilité aux autres intervenants de récupérer les courbes et la surface de référence.

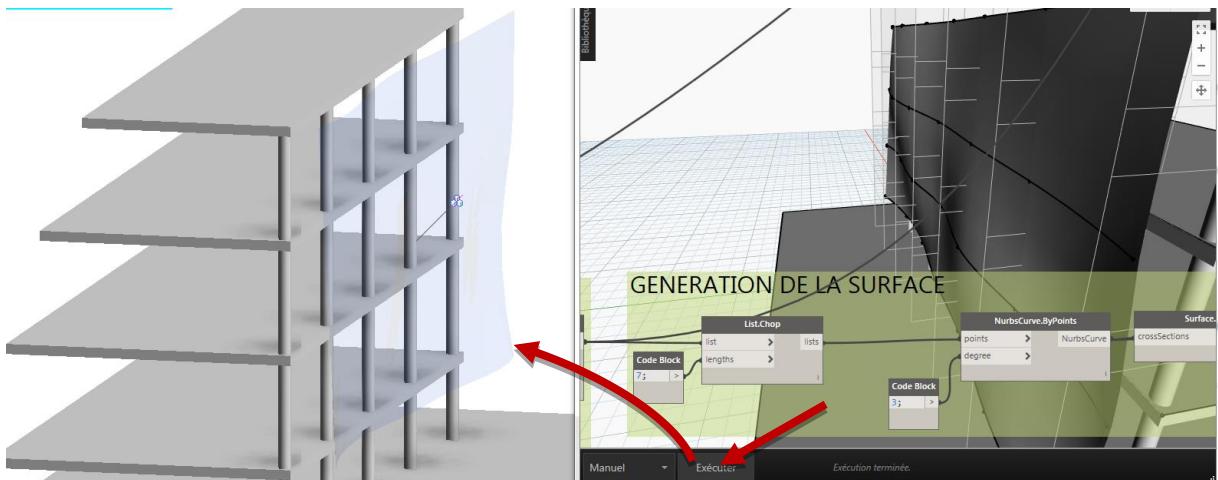


Figure 67 : Transfert automatique de la variante sélectionnée sur REVIT. Source : auteur

4.4.2. La conception des panneaux de façade :

a. Conception paramétrique /Conception continue :

La conception des panneaux est faite selon le même principe que la conception de la surface de référence. Après avoir validé la variante par l'architecte, l'intervenant 3 peut récupérer le script et le modèle généré par l'intervenant 2 (l'architecte) depuis la base de

données partagée (dans le fichier WIP). Sa mission consiste à générer les panneaux de façade selon les critères définis par l'architecte et de sa surface générée (surface de référence).

La surface de référence est l'élément de base sur lequel l'intervenant 3 va s'appuyer. Dans un premier temps, il commence par subdiviser la surface de référence en fonction de la forme des panneaux de façade définis par l'architecte.

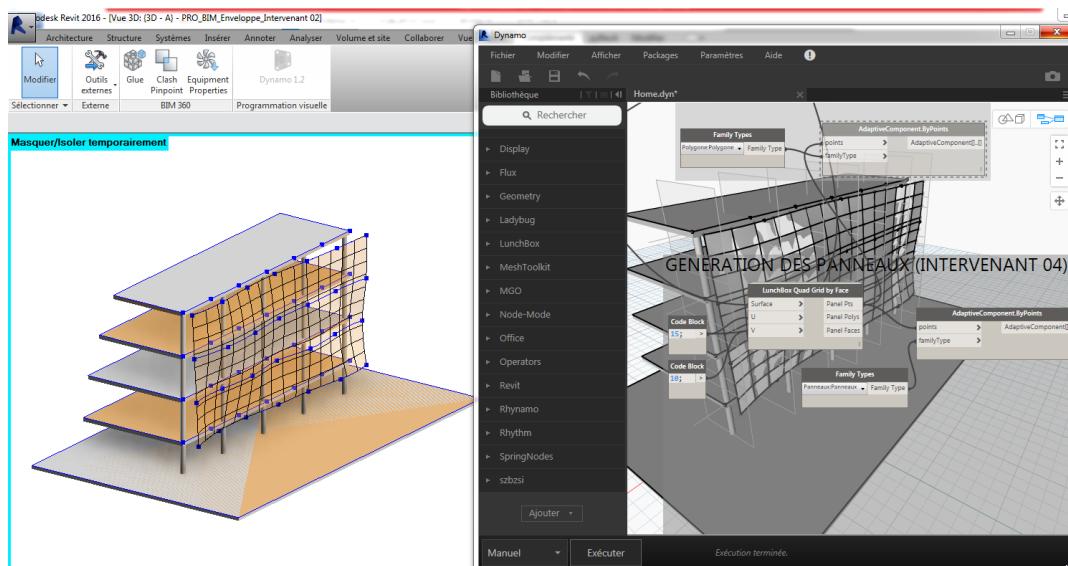


Figure 68 : la subdivision de la surface de référence. Source : l'auteur du mémoire

b. Conception d'objet paramétrique (composant adaptatif)

Le logiciel métier Revit offre la possibilité de concevoir des composants paramétriques. L'étape suivante consiste à concevoir une famille de motif adaptatif à caractère paramétrique (les dimensions du panneau et condition de conception). Le choix de motifs correspond aux motifs de la surface de références subdivisée.

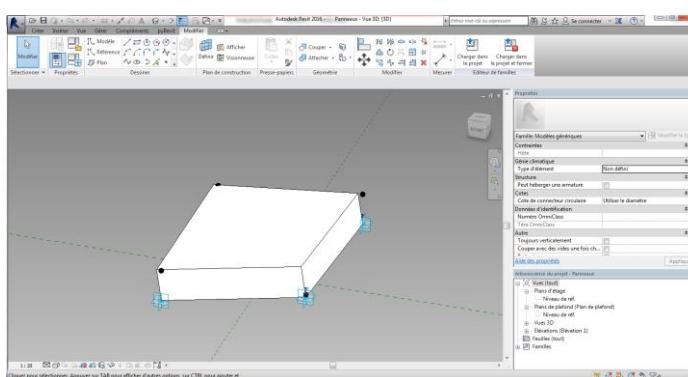


Figure 69 : la conception du composant adaptatif (panneau). Source : l'auteur du mémoire

Ensuite, la famille de motif adaptatif est chargée et instancier dans le modèle 3D de la surface divisée via Dynamo puis chargé dans le modèle 3D local.

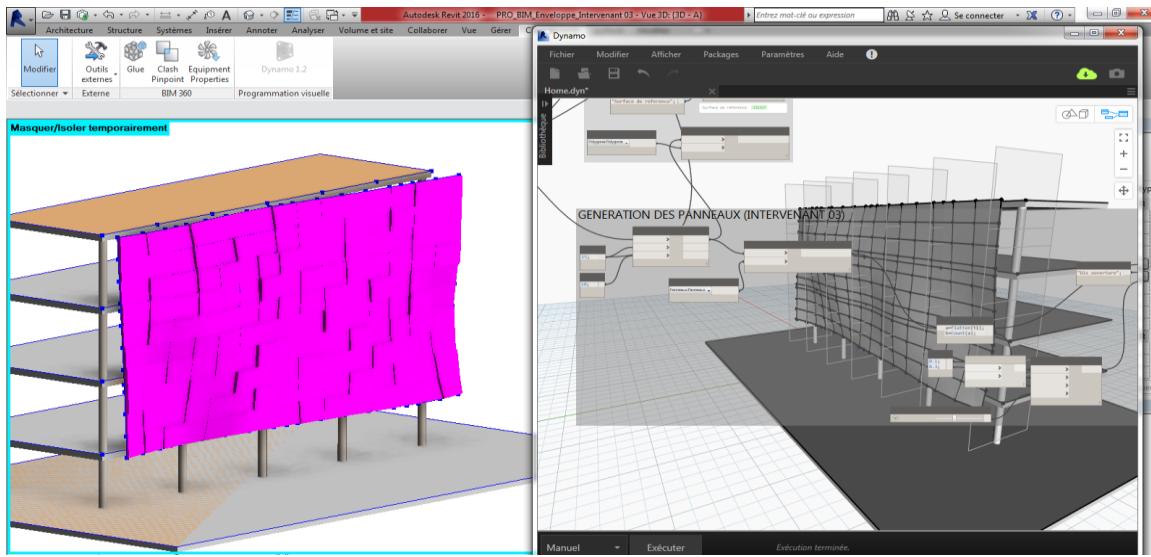


Figure 70 : la façade après la génération des panneaux. Source : l'auteur du mémoire

Après avoir synchronisé le modèle 3D local avec le modèle 3D central, l'architecte n'a pas approuvé ce type de panneau conçu par l'intervenant 3. De ce fait, une requête et un document ont été envoyés par l'architecte décrivant les conditions (ouvertures) que l'intervenant 3 doit prendre en compte dans la conception des panneaux.

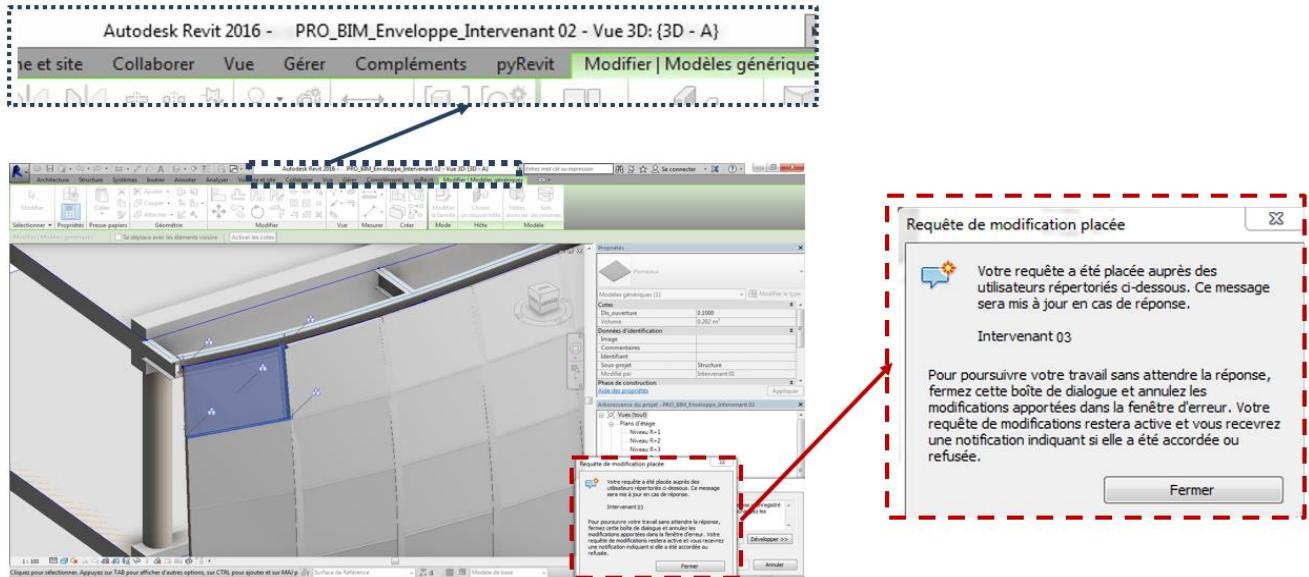


Figure 71 : requête envoyée par l'architecte (intervenant2) après la vérification. Source : auteur

L'intervenant 3 reçoit la requête envoyée par l'architecte afin de modéliser un autre type/ forme de panneau de façade tout en prenant en compte :

- les dimensions des panneaux
- les distances entre les panneaux afin de prévoir des joints et d'éliminer les chevauchements détectés entre les panneaux de façade.
- Prévoir des ouvertures dans chaque panneau

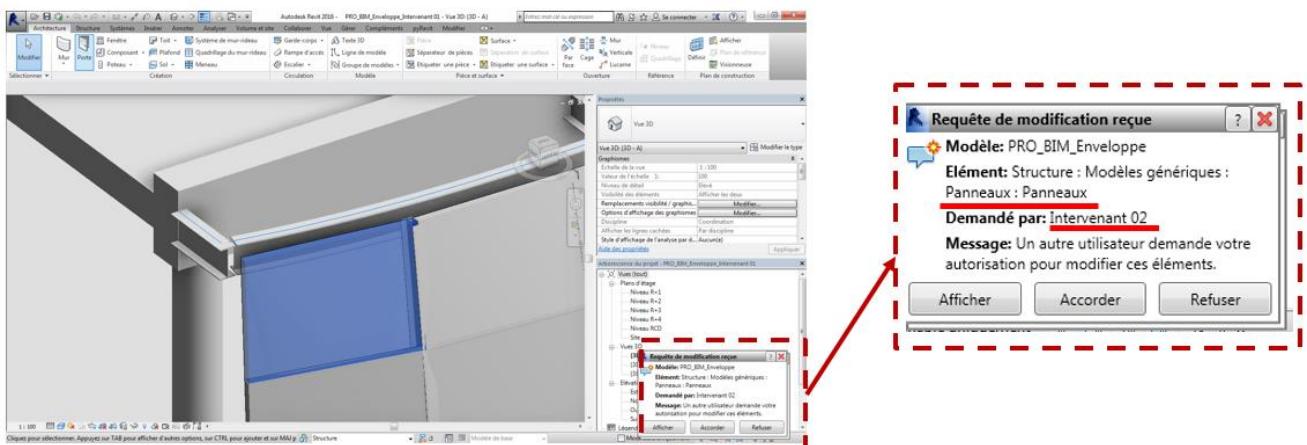


Figure 72: Requête reçue par l'intervenant 3 après la vérification. Source : l'auteur du mémoire

L'intervenant 3 modélise un autre type de panneau de façade qui sera cette fois-ci validé par l'architecte.

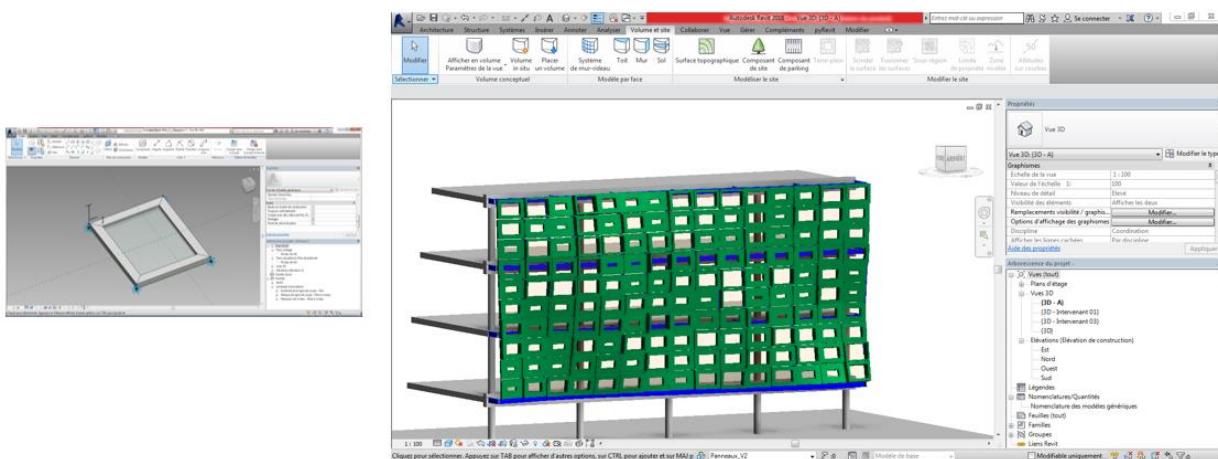


Figure 73 : la façade après la génération d'un autre type de panneaux de façade
Source : l'auteur du mémoire

c. Environnement orienté Objet

L'environnement orienté objet est un environnement à caractère paramétrique, permettant de générer des composants paramétriques d'un projet avec des catégories normées (panneaux, dalle, poutre, murs...etc.) et reconnu autant que telle par d'autre outils orientés objets. Dans cet environnement on ne conçoit plus des formes géométriques mais plutôt des objets paramétriques renseignés.

Après avoir vérifié et validé les panneaux de l'enveloppe architecturale par l'architecte, l'étape qui suit est celle de la documentation et le renseignement des objets. L'intervenant 3 prépare les documents nécessaires pour la fabrication et l'installation des panneaux.

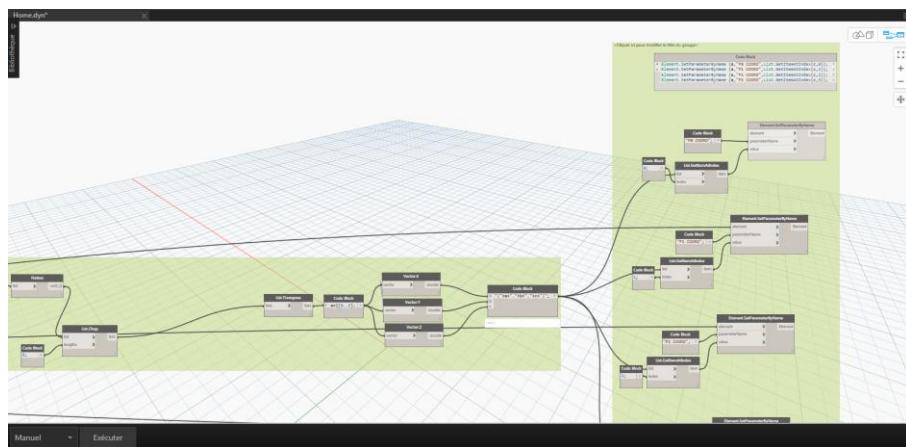


Figure 74 : script pour le renseignement de chaque panneau de façade. Source : l'auteur du mémoire

Figure 75: un tableau nomenclature contient les dimensions de chaque panneaux ainsi que les coordonnées (x,y,z) des 4 coins des panneaux (pour l'installation). Source : l'auteur du mémoire

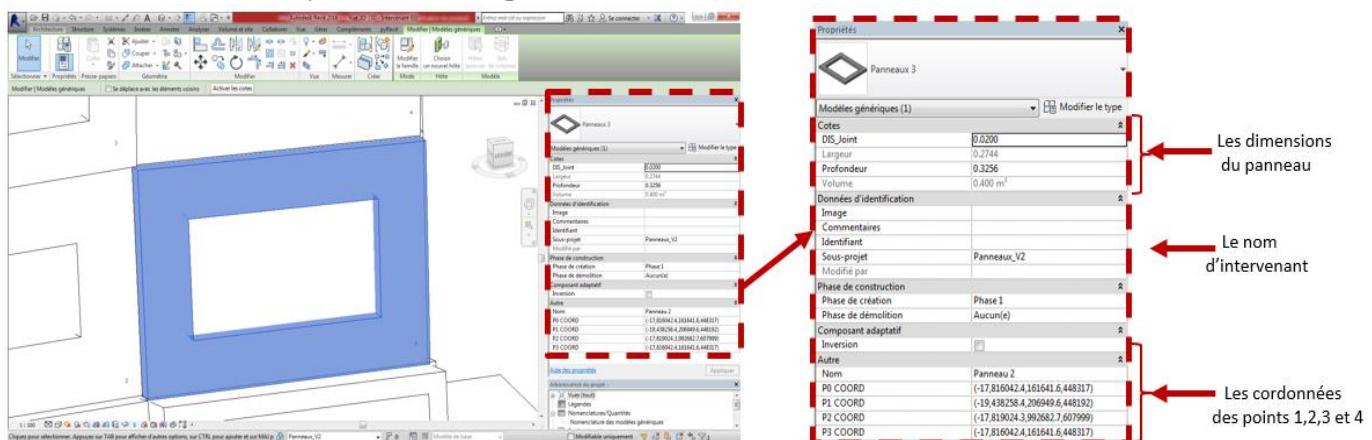


Figure 74 : Renseignement d'un panneau de façade sur REVIT. Source : l'auteur du mémoire

4.4.3. La conception des supports panneaux de façade :

a. Conception continue dans un environnement orienté objet :

L'intervenant 4 modélise les supports panneaux avec les points d'encrages en fonction de la taille, la forme et la disposition des panneaux de façade, il récupère non seulement le modèle 3D et le scripte généré par l'intervenant 3 mais aussi ceux de l'intervenant 1 (structure) car la mission de l'intervenant 4 consiste à construire des supports verticaux et horizontaux qui relient les panneaux de façade avec la structure béton du bâtiment.

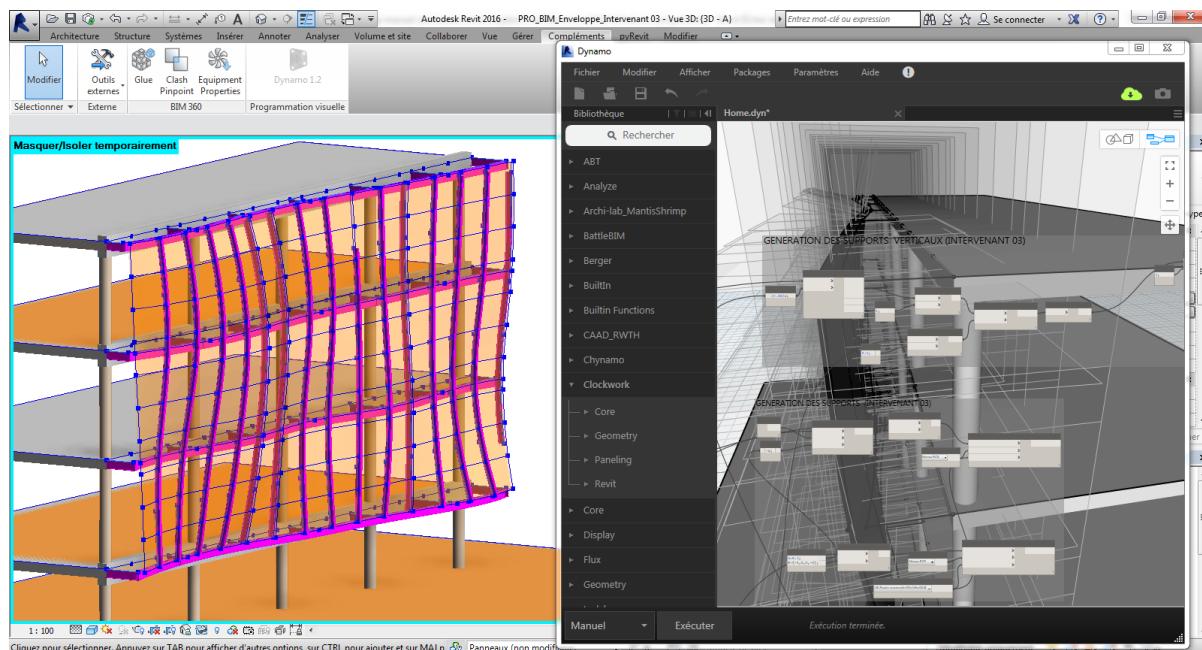


Figure 75 : la génération des supports panneaux à partir de la surface de référence et du positionnement de chaque panneau. Source : l'auteur du mémoire

4.5. SYNTHESE :

A travers cette expérimentation, nous avons constaté que le BIM repose principalement sur la collaboration entre divers intervenants. Elle porte de nombreux avantages mais aussi des obligations et des risques qu'il faut bien prendre en compte.

Dans cette partie nous allons citer les défis que nous avons affrontés ainsi que les points forts et faibles détectés à travers cette expérimentation.

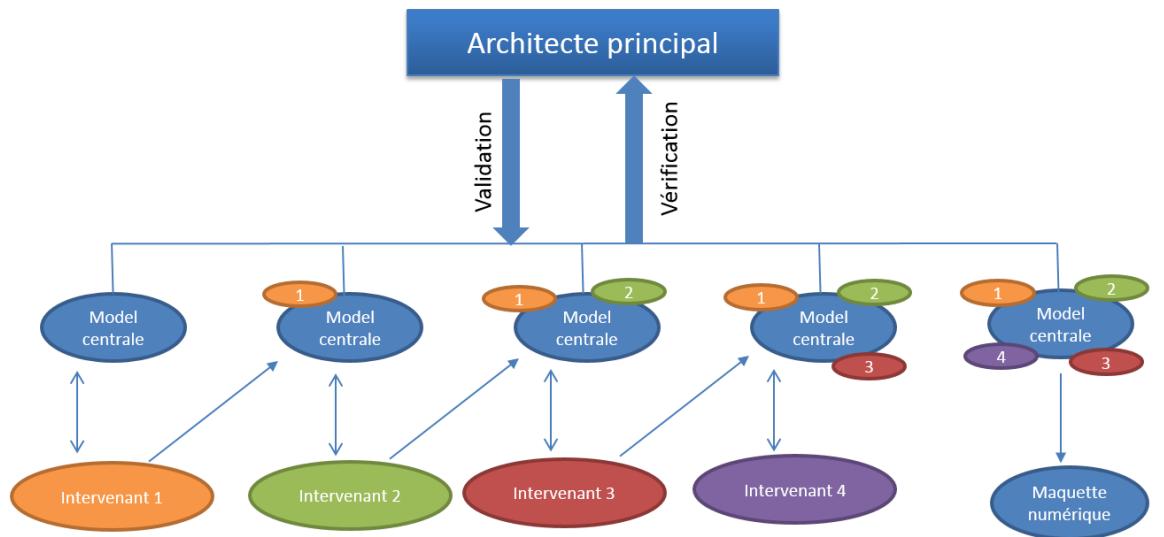


Figure 76 : l'alimentation et l'exploitation des données en fonction de l'avancement du projet.
Source : l'auteur du mémoire

4.5.1. Les échanges et le partage des maquettes numériques 3D:

La collaboration et les échanges sont faits grâce à l'alimentation et l'exploitation des données par chaque intervenant (modèle 3D local) qui sont tous connectés à un modèle 3D central. Ce modèle 3D central ne doit pas être ni déplacé ni renommé, dans le cas contraire il perd son statut de modèle 3D central et la possibilité de transférer les données entre les différents modèles 3D locaux des intervenants.

De plus, malgré que les intervenants travaillaient d'une manière successive mais il se trouve que deux intervenants (3 et 4) ont développé leurs missions en même temps. De ce fait nous avons rencontré des anomalies lorsque les intervenants synchronisent leurs modèles 3D au même moment. Ce qui nous a poussé à mettre en place un protocole de synchronisation :

« Afin d'assurer la connexion des modèles 3D en local avec le modèle 3D central sur dropbox, chaque intervenant devra respecter les heures de synchro indiquées dans un tableau (voir fichier REF). Dans le cas où les propriétaires sont en contactes vocal, ils peuvent ne pas en prendre en compte, à condition que lorsqu'un propriétaire veut faire une synchronisation, il doit le signaler à tous les intervenants. Contrairement aux rechargements à chaque ouverture

du modèle 3D, l'intervenant devra, avant toute action, faire un rechargeement des modifications faites par les autres utilisateurs et cela peut se faire sans condition »³²

On a constaté aussi la possibilité de créer des droits de lecture et d'écriture pour chaque intervenant sur les modèles 3D Revit et sur le programme Dynamo.

4.5.2. BIM et la conception paramétrique :

La conception paramétrique dans un environnement BIM permet d'effectuer rapidement la génération des modèles 3D avec des variantes, il permet aussi d'intégrer des renseignements pour chaque objet composant l'enveloppe architecturale.

De plus, la conception paramétrique assure la continuité des modèles 3D, cela permet à chaque intervenant de développer son travail à partir du modèle 3D déjà conçu par d'autre intervenant. Parmi les avantages de ce processus on y trouve:

- La modification est effectuée en temps réel et ses conséquences peuvent être visualisées par tous les intervenants.
- Etre fidèle aux modèles 3D construits par les autres intervenants et éviter les erreurs de la ressaisie.

4.5.3. Contrôle et vérification :

Puisque tous les modèles 3D sont rechargés dans un modèle 3D central, nous avions la possibilité de contrôler la conception faite par d'autres intervenants pour la valider, la modifier ou la rejeter. De plus, grâce à des logiciels de visualisation (viewer) nous avions pu détecter quelques interférences.

Remarque:

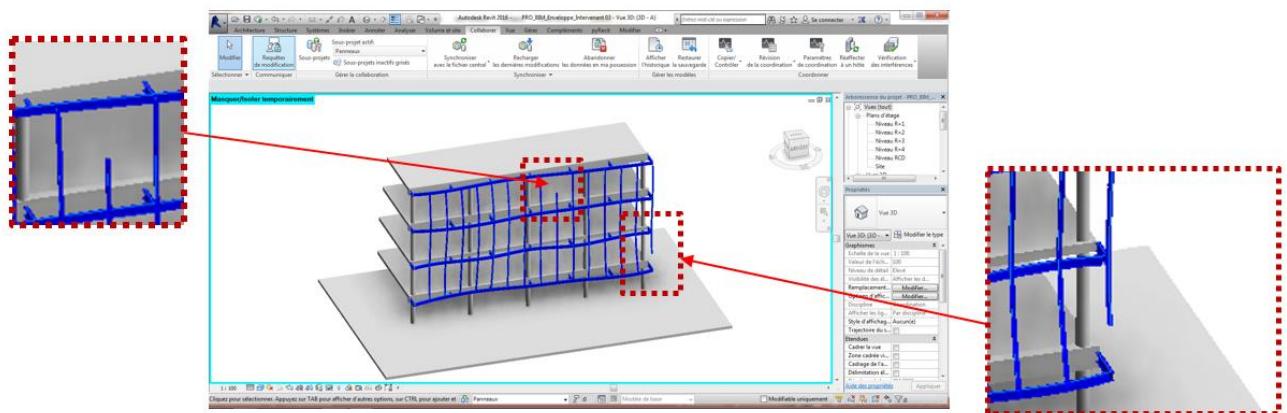


Figure 78: Les supports panneaux n'ont pas été générés en totalité. Source : l'auteur du mémoire

Lors de la modélisation des supports panneaux, nous avons remarqué que le modèle conçu sur dynamo n'a pas été générer en totalité sur Revit.

³² Protocole mis en place par l'auteur du mémoire

Pour conclure, à travers cette expérimentation nous avons pu vérifier et confirmer que le BIM peut assurer :

- La cohérence entre les différents modèles 3D des intervenants
- L'étude des enveloppes qui représentent une certaine complexité
- Le suivi et le contrôle (par l'architecte principal)
- Les échanges des données entre les différents intervenants

CONCLUSION GENERALE :

L'intention de ce mémoire de recherche était de comprendre et de vérifier si le BIM influence sur la conception des enveloppes architecturales en termes de qualité et de processus. A travers des articles publiés, des témoignages, des conférences, d'analyse des cas d'études et d'expérimentation nous avons pu constater que avec l'arrivée du BIM la pratique architecturale a pris un nouveau tournant.

A partir de l'expérimentation, nous avons constaté que le BIM en tant que processus n'influence pas sur la qualité des enveloppes architecturales, car c'est un processus de gestion et de collaboration.

Le logiciel métier peut-il brider et standardiser l'architecture ?

L'utilisation de l'outil métier, qui est imposé par le processus BIM, ne bride pas l'architecture à mon sens. Malgré que ce type de logiciel ne présente pas une certaine flexibilité et demande une bonne maîtrise pour la génération de tout type de forme, d'autres méthodes peuvent être mises en place afin d'arriver à concevoir des modèles 3D métiers à géométries complexes. Comme on a déjà remarqué dans les cas d'études, grâce au caractère d'interopérabilité, la forme de l'enveloppe peut être générée dans un logiciel d'aide à la conception puis importée dans un logiciel métier afin de développer l'enveloppe architecturale avec la collaboration de divers intervenants. Une autre méthode de conception permet la génération des formes complexes dans un outil métier est celle de la conception participative entre plusieurs intervenants. Dans le cas de notre expérimentation, on a pu concevoir une surface de référence complexe à partir des éléments structuraux d'une façade simple.

En outre, le BIM ne standardise pas l'architecture car les éléments qui composent le bâtiment ne proviennent pas uniquement des catalogues des fabricants. Ces éléments peuvent être personnalisés en fonction de la conception et du choix de l'architecte comme illustre le cas de l'expérimentation. En revanche, la personnalisation des éléments reste complexe et la conception de tous les objets demande un temps phénoménal. De ce fait, le concepteur peut se servir de la bibliothèque des fabricants pour réduire les délais de conception. La complexité de ce type de logiciel peut pousser l'architecte concepteur à prendre des décisions qui peuvent standardiser l'architecture.

Le BIM peut-il influencer le processus de conception ?

Le BIM influence sur le processus de conception par l'intégration de plusieurs intervenants dès la première phase de conception. Ce processus permet à l'architecte de redevenir le chef d'orchestre par le contrôle et la vérification du travail de chaque intervenant en temps réel via la maquette numérique. De plus, la phase de conception est devenue étroitement liée à la phase de fabrication et de l'installation sur chantier. L'architecte ne conçoit plus des pièces graphiques mais plutôt des éléments et des objets destinés à être fabriqués. Avec les caractéristiques définies de chaque objet de la construction virtuelle, il est

possible d'effectuer des tests, des simulations et visualiser les comportements du projet avant même qu'il soit construit, cela rend possible la détection des interférences dès la phase de conception.

Avec le BIM, les éléments du projet ne sont pas éparpillés chez tous les intervenants. Ils sont intégrés dans un seul modèle 3D (une seule maquette numérique), chaque intervenant à la possibilité d'y apporter des éléments en fonction de sa mission et d'extraire les données mis à jour par d'autres intervenants afin de développer son travail. En phase de conception, la maquette numérique permet la bonne compréhension des espaces, des éléments et des objets déjà intégrés, en cas d'ambiguïté, l'intervenant peut naviguer dans la construction virtuelle ou sélectionner les éléments en question afin de trouver les repères.

L'intégration et le partage des données sont les éléments qui permettent aux membres de l'équipe d'avoir accès à toutes les informations nécessaires d'une manière plus rapide et plus pratique.

L'expérimentation était un moyen par lequel nous avons vérifié nos hypothèses, car à travers notre recherche nous avons remarqué que le BIM est de plus en plus soutenu par les agences d'architecture, les BET et les entreprises. Malgré les différents témoignages des architectes et l'analyse des cas d'études, nous avons préféré de le vérifier par nous-même. A l'échelle de notre expérimentation, le BIM paraît une pratique avec des avantages multiples pour le processus de conception. En revanche à une échelle plus importante (les projets) le BIM affronte différents défis qui peuvent influencer sur la conception. Le risque est d'être confronté à des niveaux de maturité différents entre les équipes de conception, à l'utilisation de différents outils par les intervenants et à l'absence des règlementations et des normes.

Pour finir, le BIM est un processus de gestion et de collaboration, son influence sur la conception des enveloppes architecturales dépend des utilisateurs, de la charte et de flux de travail défini par le chef d'orchestre (architecte, BIM manager ou autre profil). Nous devrons nous rappeler que le processus BIM n'est pas un but en soi, mais un moyen par lequel on peut trouver de meilleures repères et solutions. Il peut avoir un impact sur le budget et le délai de la réalisation des projets, mais ce processus ne peut à aucun cas remplacer la créativité ou l'intention des concepteurs (idée, traduction et représentation).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE :

- *Olivier Celnik, Eric Lebègue*, BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction. Editeur(s) : Eyrolles, CSTB. 2014
- *Olivier Celnik, Eric Lebègue*, BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction. Editeur(s) : Eyrolles, CSTB. 2015
- *Karen KENSEK*, Manuel BIM théorie et applications, Edition EYROLLES 2015 pour l'Edition en langue Française
- *Nadia Hoyet, Fabien Duchène, Marc de Fouquet*. BIM et architecture. Edition Dunod 2016
- *SYLVIAN Kubicki, Gilles Halin et jean-Claude Bignon*, SCAN 2014, Interaction des maquettes numérique. Edition : PUN 2014
- *Eddy Krygiel, Brad Nies, Steve McDowell*. Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling. Edition: SYBEX 2008.
- *François PELEGRIN*, ARCHI BIM. Edition PC 03/2017

Liens :

- <https://www.amc-archi.com/article/l-occasion-de-reprendre-la-maitrise-du-projet-par-jacques-levy-bencheton-architecte-associe-et-bim-manager-brunet-saunier-architecture-paris,1528>
- <https://www.amc-archi.com/article/le-bim-est-la-derniere-chance-des-architectes-de-redevenir-les-maitres-d-uvre-qu-ils-ont-cesse-d-etre-par-olivier-arene-architecte,1552>
- <https://www.amc-archi.com/article/le-bim-un-workshop-interactif-par-louis-paillard-architecte,1564>
- <https://www.amc-archi.com/article/to-bim-or-not-to-bim-that-is-the-question-par-severin-schaefer-architecte-et-bim-manager,2058>
- <https://www.amc-archi.com/article/l-humain-est-au-c-ur-du-processus-bim-par-gabriel-castel-bim-et-consulting-manager-nemetschek,1597>
- <https://www.amc-archi.com/article/a-qui-profite-le-bim-par-xavier-sterlin-espaces-libres-architecture-paris,1618>
- <https://labeilleetlarchitecte.wordpress.com/2015/02/09/larmoire-a-plans-fable-industrielle-et-bureaucratique/#more-4781>
- <https://msbim.estp.fr/?p=2095>
- http://lyceegaudier.com/fichiers/documents/Documents_liens_utiles/Guide_pratique_du_MONITEUR_Le_BIM_contenu_et_niveau_de_developpement.pdf
- <http://www.darchitectures.com/retour-sur-le-bim-et-ses-acteurs-a2236.html>
- <https://labeilleetlarchitecte.wordpress.com/2015/05/26/mais-qui-pousse-au-bim/>

Conférences et événement :

- BIM World Paris La Défense 2017
- *Francesco Cingolani & Olivier Celnik*, BIM ET COMPUTATIONAL DESIGN VOL.2 Architectes et ingénieurs : quelles relations entre logiciels et créativité ?"
- 4èmes Assises du BIM dans l'architecture - ENSA de Paris-Malaquais
- *Olivier DUFAU, Antoine Picon*, colloque «l'architecture face au marché »
- *Emmanuel Di Giacomo*, Analogique, numérique et BIM, impact des outils sur la créativité architecturale