

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine d'étude : Savoirs des Activités de Projet Instrumentées

UTILISATION DE LA PHOTOGRAMMETRIE POUR LA PRODUCTION D'UN MODELE 3D UTILISABLE LORS D'UNE ANALYSE STRUCTURELLE EN ECOLE D'ARCHITECTURE

Encadré par François Guéna, Joaquim Silvestre et Anne Tüscher

École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette

Auteur : Aurélien Vacher

Date : 09 janvier 2024



Table des matières

INTRODUCTION	1
PARTI I : PRÉSENTATION DU SUJET	3
Chapitre 1 : Heritage Building Information Modelling.....	3
1.1 Collecte des données	4
1.2 Relevé de l'existant	4
1.3 Modélisation	5
1.4 Ajout d'informations	6
Chapitre 2 : Une analyse structurelle en H-BIM.....	7
Chapitre 3 : Modèle structurel sur ArchiCAD.....	8
3.1 Modèle analytique structurel (MAS)	8
3.2 Exportation du MAS	9
PARTIE II – MÉTHODE D'EXPÉRIMENTATION	10
Chapitre 4 : Relevés	10
4.1 Photographique	10
4.2 Géométrie	13
Chapitre 5 : Modélisation	13
5.1 Les logiciels	13
5.2 Le traitement photogrammétrique	15
5.3 Création du modèle 3D.....	17
Chapitre 6 : Calcul structurel.....	18
6.1 Les logiciels	18
6.2 Le traitement	19
PARTIE III : EXPÉRIMENTATION.....	23
Chapitre 7 : Conception et utilisation du modèle.....	23
7.1 Relevés	23
7.2 Modélisation	24
7.3 Calcul structurel.....	29
CONCLUSION.....	35
BIBLIOGRAPHIE.....	36

INTRODUCTION

Durant les études d'architectures, les étudiants sont amenés à travailler sur une multitude de projet où les questions sont diverses et variées. Allant du logement à une analyse urbaine sur un territoire, leurs domaines d'étude sont très larges. Il est donc normal que des outils soient mis à leur disposition pour les assister durant ces différents temps d'études et notamment concernant les différentes phases d'un projet.

Comme je viens de le dire, il existe une multitude de projet en architecture, mais ceux qui vont nous intéresser ici sont les projets de réhabilitation. Selon C. Leconte, présidente du conseil national de l'ordre des architectes, citée par E. Borne en 2021, « *Réparer c'est restaurer, réhabiliter, rénover, recréer : faire avec ce que l'on a déjà. La réhabilitation remet tout en question. Elle remet en question nos manières de pratiquer l'architecture car elle demande un diagnostic de ce que l'on a déjà.* ». Il faut donc se renseigner sur ce que l'on a pour définir notre mode d'intervention. De plus un projet de réhabilitation en lui-même comporte plusieurs étapes qui sont aussi importantes les unes que les autres. Dans un premier temps, il convient de définir les objectifs du projet. En d'autres termes, il faut choisir les actions principales qui devront être réalisées et définir les priorités à traiter. Ensuite, vient la partie d'analyse de l'existant, aussi appelé le diagnostic. Il faut se renseigner sur la réglementation qui s'applique au bâtiment sur lequel nous intervenons et donc identifier toutes les contraintes réglementaires auxquels nous pourrions faire face, ce à quoi s'ajoute une analyse du bâtiment en lui-même à l'aide d'une analyse structurelle. Après quoi nous pouvons entrer dans la phase de d'esquisse et de conception du projet pour répondre à la demande de la maîtrise d'ouvrage. Enfin, après dépôt du permis de construire et toutes les démarches administratives à réaliser avec, la réalisation du projet peut avoir lieu.

Dans ce mémoire, nous allons plus particulièrement nous intéresser à cette phase d'analyse du projet et notamment la partie analyse structurelle du bâtiment à réhabiliter. Cette analyse permet d'identifier les éléments porteurs ainsi que les charges que ceux-ci peuvent soutenir. Pour faciliter cette phase d'analyse ainsi que toutes les autres étapes qui interviennent dans une réhabilitation en architecture, une méthode a été développée en prenant en compte les progrès technologiques de notre époque et s'appelle le H-BIM¹. Cette méthode reprend le principe du BIM² qui consiste en la conception de modèle contenant une grande quantité d'informations pour permettre à tous les acteurs du projet de pouvoir intervenir en même temps sur un seul élément. Ici, nous allons donc regarder la conception de ce modèle lors d'une réhabilitation. Il est important de noter, qu'il s'agit là d'un projet d'étudiant en architecture et que donc toutes les données présentes dans un modèle BIM ne seront pas nécessaires au

¹ Heritage Building Information Modelling

² Building Information Modeling

bon déroulement du projet, ce qui veut dire que la précision de celui-ci n'a pas besoin d'être à son maximum.

Pour pouvoir concevoir le modèle d'un bâtiment existant, il faut souvent réaliser en premier lieu un relevé de celui-ci. Il existe plusieurs manières d'effectuer un relevé et celle principalement utilisée pour le H-BIM est la lasergrammétrie, qui nécessite l'utilisation d'un laser afin de scanner le bâtiment analysé pour ensuite générer un nuage de points 3D. Cependant, comme je l'ai dit précédemment ce mémoire prend place en école d'architecture et en se plaçant du point de vue d'un étudiant, il ne m'est donc pas possible d'avoir accès à un tel matériel. En revanche, il est également possible de réaliser ce relevé par photogrammétrie, autrement dit avec simplement l'emploi de photo pour produire un nuage de points. De plus, aujourd'hui, il est possible avec un simple appareil photo de téléphone portable d'obtenir des photographies d'assez bonnes qualités pour être utilisées dans un logiciel de photogrammétrie. Par la suite, ce modèle sera utilisé dans un logiciel de MEF (Méthode par Eléments Finis), pour réaliser les calculs structurels qui permettront de définir les charges admissibles par la structure porteuse existante.

Nous allons donc voir à travers ce mémoire, s'il est possible d'appliquer cette méthodologie sur un projet de réhabilitation en école d'architecture, pour réaliser rapidement une analyse structurelle d'un bâtiment existant, en produisant un modèle 3D utilisable dans un logiciel de MEF par photogrammétrie.

Ce mémoire sera donc divisé en trois parties. Dans la première partie, je présenterai le contexte de l'étude. La deuxième partie quant à elle servira à présenter mon expérimentation en détaillant la réalisation de celle-ci. Je terminerai dans la troisième partie en présentant la conception du modèle.

PARTI I : PRÉSENTATION DU SUJET

Dans cette première partie, nous allons voir ce qu'il est actuellement possible de réaliser lors d'un projet de réhabilitation H-BIM, ainsi que la manière dont nous chercherons à adapter cette méthode pour l'appliquer à un projet d'étudiant en école d'architecture.

Chapitre 1 : Heritage Building Information Modelling

Le terme H-BIM ou Heritage Building Information Modelling a été utilisé pour la première fois par le professeur Maurice Murphy en 2009 dans un article scientifique *Historic building information modelling*. Il s'agit de mettre en œuvre les procédés utilisés pour la construction d'un modèle BIM, pour un bâtiment existant. Un modèle BIM est un modèle numérique du projet qui contient toutes les informations relatives à celui-ci, qu'on appelle aussi son jumeau numérique.

Le BIM étant avant tout une méthode de travail que l'on met en place pour mutualiser les informations techniques du projet et faciliter les échanges entre les différents acteurs intervenants dans celui-ci.

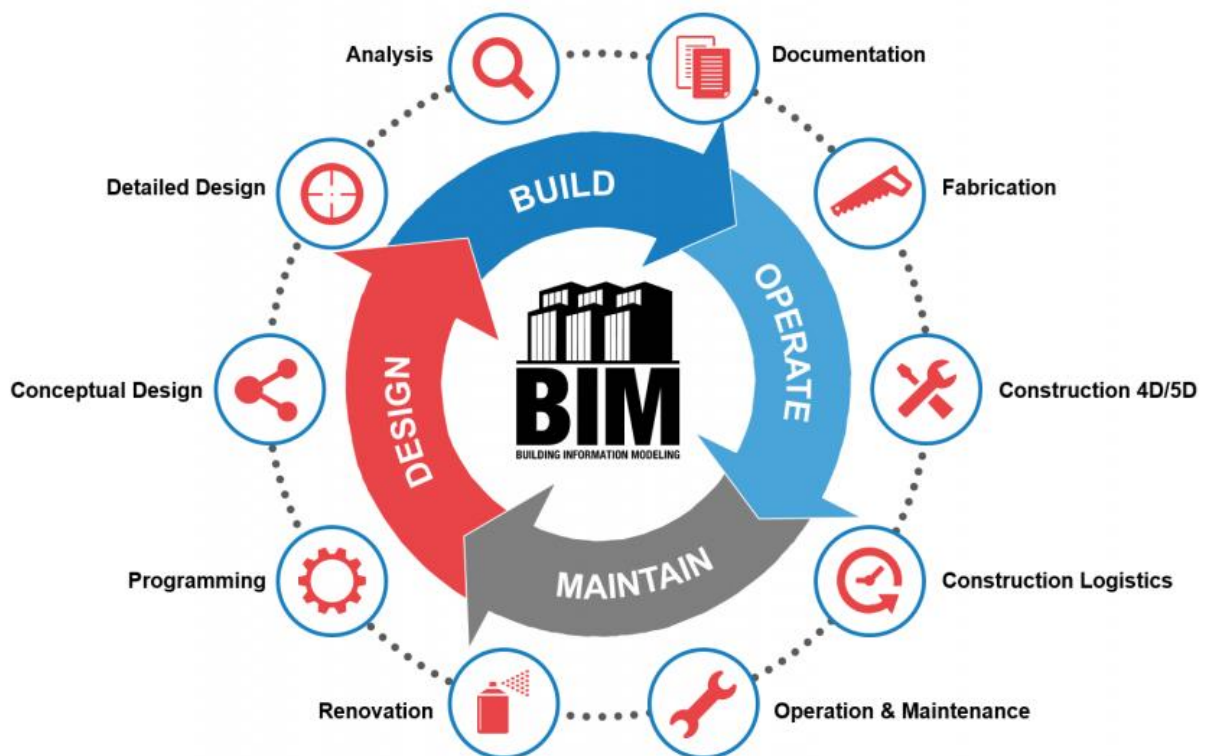


Figure 1 Schéma du BIM
(Image issue de l'article le BIM en 10 questions)

A travers cette méthode BIM, on cherche à faciliter toutes les tâches qui composent un projet, allant de sa conception à son entretien une fois celui-ci réalisé. La question s'est alors posée de savoir si il était possible d'appliquer cette méthode de travail initialement utilisée pour des constructions neuves à des projet sur des bâtiment déjà existants.

Les premières applications de ce processus H-BIM furent pour des bâtiments du patrimoine historique afin de créer une base de données communes et facile à diffuser entre tous les acteurs du projet. A présent ce processus peut être appliqué pour tous les projets intégrant des bâtiment existants.

Tous projet de H-BIM suit une sorte de protocole que je vais développer brièvement ci-après puisque ce n'est pas tout le protocole qui nous intéresse ici mais simplement une partie de celui-ci.

1.1 Collecte des données

La première étape à réaliser lorsque l'on intervient sur un bâtiment existant est de collecter toutes les informations déjà existantes à son sujet. Pour ce faire, il faut réaliser une analyse historique de celui-ci afin de trouver des éléments tels que des plans, des coupes, des photographies ou tout autres documents qui nous permettraient de comprendre sa composition et son fonctionnement. Il s'agit là d'un travail fastidieux de collecte de données mais bien entendu nécessaire pour faciliter l'analyse du bâti existant.

1.2 Relevé de l'existant

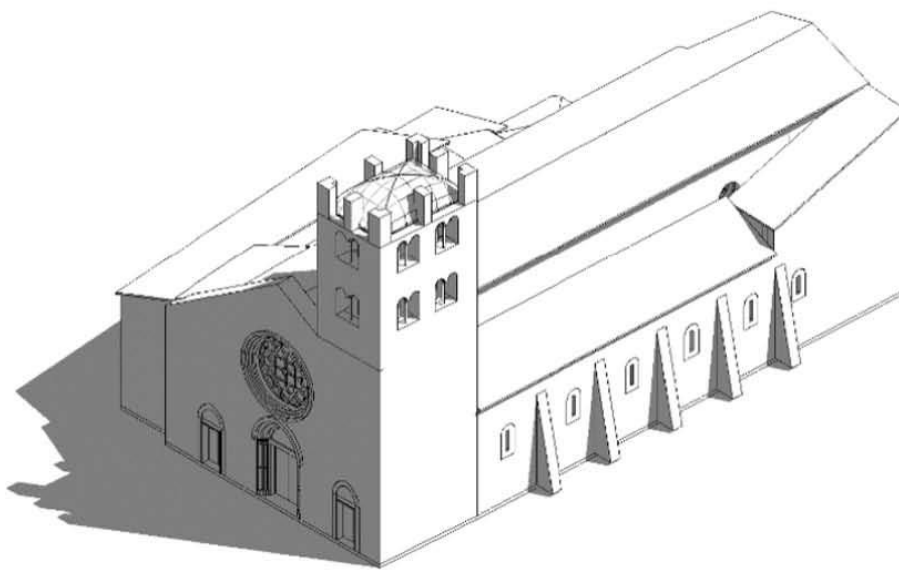
Avant de commencer une modélisation du projet, il convient de réaliser un relevé de l'existant pour obtenir des données qui serviront à une modélisation précise de l'existant. Pour ce faire, deux méthodes de collecte sont généralement utilisées, la lasergrammétrie terrestre et la photogrammétrie. La première méthode consiste à utiliser un laser afin de scanner le projet, tandis que l'autre utilise des photographies pour obtenir un nuage de points de l'existant. Ce à quoi s'ajoute un relevé géométrique qui permettra le dimensionnement exact des éléments, ainsi que leur matérialité.



*Figure 2 Photographie d'une église italienne et le nuage de points obtenue de celle-ci
(Source : Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches
from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling)*

1.3 Modélisation

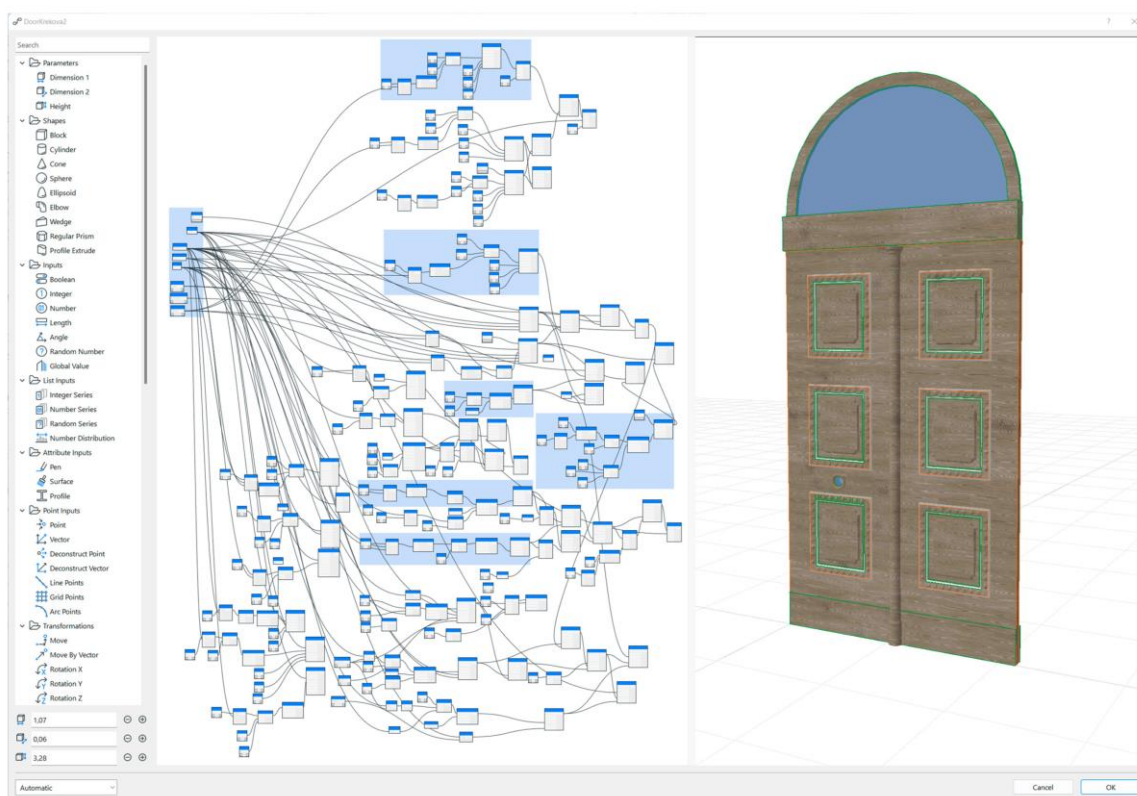
Ces données préalablement obtenues ont donc servi à obtenir un nuage de point dense qui va être à son tour utilisé pour créer un modèle 3D du projet. Pour ce faire, l'emploi de logiciel spécifique va être requis. Le nuage de point sert de base pour la modélisation, afin de correctement positionner les différents éléments qui composent le modèle ainsi que vérifier leur bon dimensionnement. Suivant les logiciels utilisés, il existe des objets prédéfinis dans le logiciel même, cependant il est tout à fait possible de créer son propre objet au sein du logiciel pour le réutiliser par la suite. De plus grâce à tous les projets déjà réalisés, les bibliothèques de données augmentent au fur et à mesure.



*Figure 3 Modèle géométrique non texturé de l'église italienne
(Source : Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis trough heritage building information modeling)*

1.4 Ajout d'informations

Une fois le modèle 3D obtenu, celui-ci va être partagé aux autres acteurs du projet, pour que chacun puisse rajouter ces connaissances spécifiques sur les éléments constitutifs du projet. Voici par exemple un schéma présentant toutes les informations pouvant être contenue pour une porte d'entrées dans un projet H-BIM.



*Figure 4 Schéma des informations contenue dans une porte d'entrée
(Source : Optimizing H-BIM Workflow for Interventions on Historical Building Elements)*

Enfin, ce modèle pourra servir de base pour des analyses plus poussées et être intégré dans des logiciels d'ingénierie structure ou fluide par exemple, voir même associé à un système de VR³ pour faciliter la visualisation du projet. De plus celui-ci permettra par la suite l'obtention de dessins et de plans d'exécutions.

³ Virtual reality

Chapitre 2 : Une analyse structurale en H-BIM

Il est déjà courant de nos jours, de voir une analyse structurale dans un procédé de H-BIM comme le montre l'article *Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling* (D. Pirchio, 2021), où l'on peut suivre l'analyse structurale d'une église italienne basée sur la méthode du H-BIM. Cette étape est importante lors de l'évaluation du bâti existant puisqu'elle permet de définir l'état structurel du bâtiment. De plus l'emploi du BIM tend à faciliter la réalisation de cette analyse via l'interopérabilité que met en place ce mode de travail.

Par ailleurs, une étude a été menée pour proposer un flux de travail H-BIM lors d'une analyse structurale d'un bâtiment en maçonnerie, intitulée *Parametric HBIM Procedure for the Structural Evaluation of Heritage Masonry Buildings* (R. Bento, 2022). Il y est démontré la pertinence de joindre un modèle BIM à une étude structurale pour faciliter les échanges entre les architectes et les ingénieurs et ainsi gagner du temps et éviter le nombre d'erreurs susceptible d'être commises.

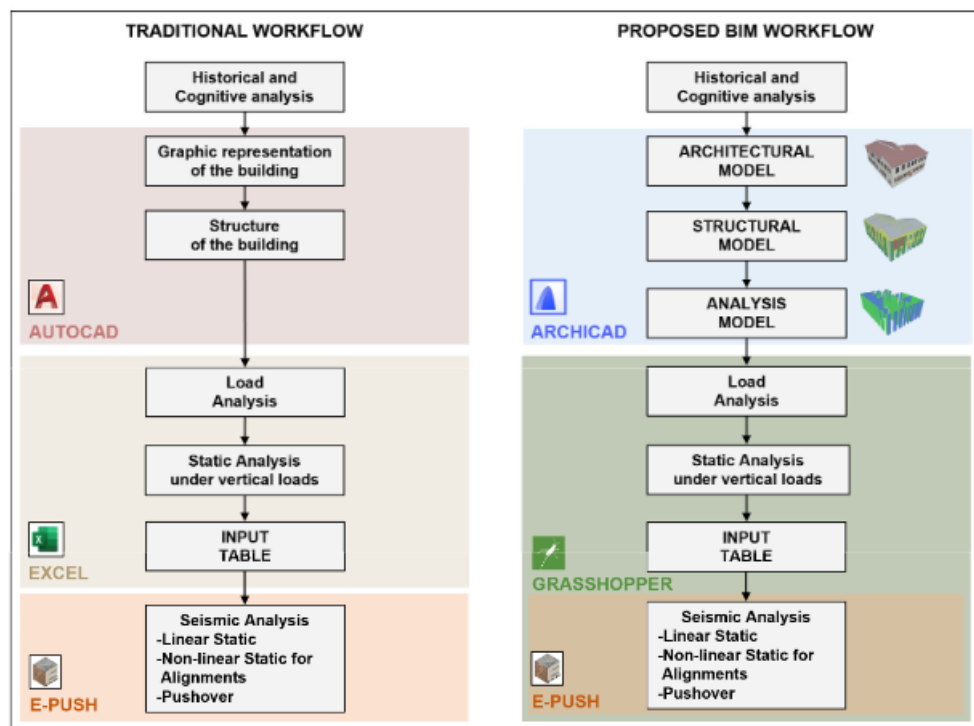


Figure 5 Schéma d'un flux de travail pour une analyse structurale
(Source : *Parametric HBIM Procedure for the Structural Evaluation of Heritage Masonry Buildings*, p7)

Ce qui est également intéressant à noter dans ce schéma est l'obtention d'un modèle architectural et d'un modèle structurel au sein d'un même logiciel, ici ArchiCAD. C'est justement l'un des points qui nous intéresse, puisqu'en tant qu'étudiant nos moyens sont restreints comme nos outils de travail.

Chapitre 3 : Modèle structurel sur ArchiCAD

3.1 Modèle analytique structurel (MAS)

Grâce aux innovations technologiques que le logiciel propose, et ce depuis l'année 2020, si les propriétés des éléments sont correctement renseignées, il est possible d'obtenir un modèle structurel facilement et rapidement, qui puisse ensuite être exporté dans les différents logiciels de calculs structurel. Cela nécessite une bonne identification des éléments structurels lors de la conception du modèle 3D. Via le changement de profil dans ArchiCAD, il est très facile d'avoir accès à celui de l'ingénieur qui dispose de tous les outils nécessaires à une bonne modélisation. En effet cette possibilité de permuter entre le profil architectural et le profil ingénieur facilite grandement cette modélisation.

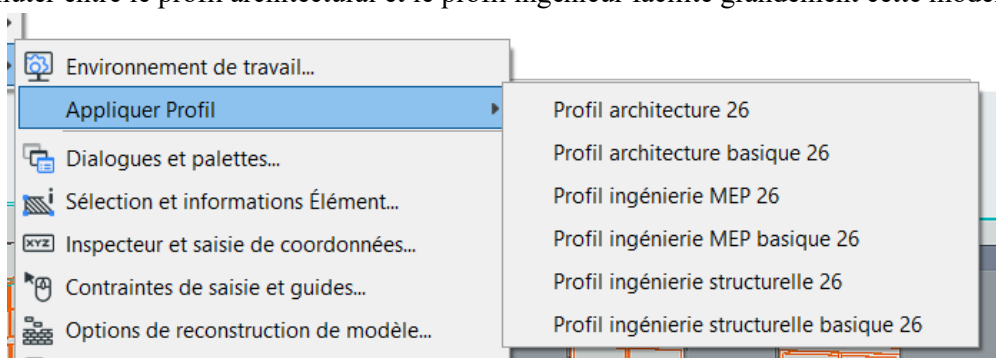


Figure 6 Les différents profils disponibles sur ArchiCAD
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Des objets de modélisation sont donc mis à notre disposition pour générer le modèle analytique structurel automatiquement. Pour ce faire il faudra utiliser les outils dalle, mur, poteau, poutre et toit dans le logiciel, en revanche il faudra faire attention à définir correctement ces éléments comme étant porteur dans leurs propriétés.

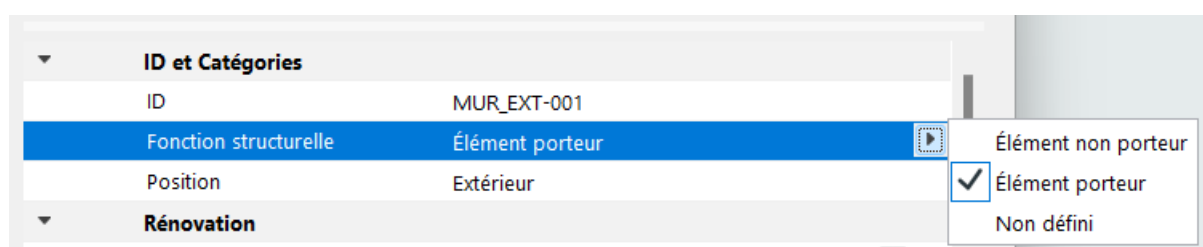


Figure 7 Définition du paramètre élément porteur
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Il est donc très simple d'identifier les éléments porteurs et non-porteurs dans ArchiCAD, mais il est également possible de rentrer encore plus en détail dans la définition des éléments porteurs. Par exemple, il est possible de déterminer l'âme porteuse d'un élément dans les structures composites. En d'autres termes, si la modélisation est réalisée avec un mur composite, c'est-à-dire composé de plusieurs matériaux, il est alors possible de définir à quel endroit dans ce mur se trouve l'élément porteur.

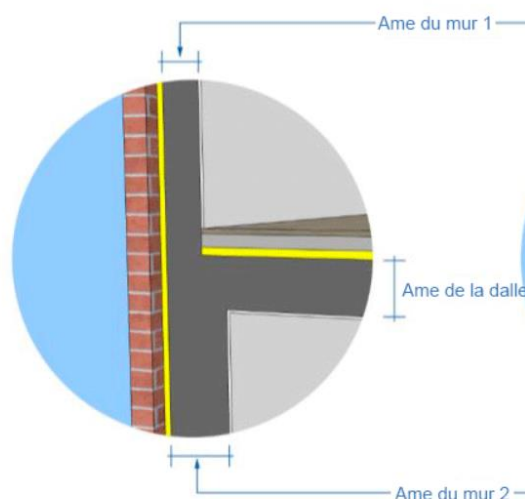


Figure 8 Représentation des différentes âmes porteuses des éléments porteurs
(Source : Site Graphisoft ArchiCAD)

Le fait de pouvoir générer directement un modèle analytique structurel permet de limiter le risque d'erreur et s'avère être un gain de temps conséquent lors de la modélisation. Ce modèle peut ensuite être utilisé dans des logiciels de MEF⁴ par exemple pour réaliser des calculs structurels.

3.2 Exportation du MAS

Le MAS peut ensuite être partagé avec n'importe quelle application d'analyse structurel qui prend en charge les formats de fichier Open source proposés dans ArchiCAD, qui sont le format d'analyse structurel (SAF) et la vue d'analyse structurelle IFC⁵ (IFC SAV). Le premier étant un schéma sur base Excel optimisé pour la collaboration bidirectionnelle entre des modélisateurs structurels comme ArchiCAD et des applications d'analyse structurelle utilisant la méthode des éléments finis. Pour permettre une bonne identification et interprétation du MAS dans le logiciel d'analyse structurel, un traducteur SAF a été mis en place dans ArchiCAD pour traduire les informations contenues suivant les différents logiciels externes qui pourraient être utilisés. Le deuxième format quant à lui permet l'importation et l'exportation du MAS au format IFC. Ce format permet de décrire des objets (murs, fenêtres, dalle, poteaux...) ainsi que leurs relations (comme le percement d'un mur par une ouverture et l'association d'une porte à cette ouverture). Il définit la façon dont l'information va être structurée pour pouvoir être lue et correctement interprétée par l'ensemble des logiciels.

⁴ Méthode des Éléments Finis

⁵ Industry Foundation Classes

PARTIE II – MÉTHODE D'EXPÉRIMENTATION

Dans cette deuxième partie, je vais dans un premier temps présenter les relevés nécessaires à réaliser sur place. Ensuite, je présenterai les logiciels utilisés pour effectuer la modélisation 3D ainsi que leurs utilisations. Enfin je terminerai en présentant le logiciel de calcul structurel que j'ai utilisé ainsi que son fonctionnement.

Chapitre 4 : Relevés

La production d'un modèle 3D nécessite dans un premier temps la réalisation de relevés in situ afin d'acquérir un certain nombre de données numériques et géométrique.

4.1 Photographique

Dans les logiciels de photogrammétrie, deux méthodes d'acquisitions de données peuvent être utilisés. La première nécessite l'utilisation d'un laser, cependant en tant qu'étudiant je n'ai pas la possibilité d'avoir accès à ce type de matériel. Nous allons donc nous concentrer sur le deuxième procédé qui correspond quant à lui à un relevé photographique du bâtiment à analyser.

Pour ce faire, certaines règles sont à respecter pour réaliser un relevé dans les meilleures conditions. Il faut bien prendre en compte que le protocole à effectuer pour réaliser le relevé d'un objet varie suivant sa taille et sa morphologie comme nous pouvons le voir sur le schéma suivant.

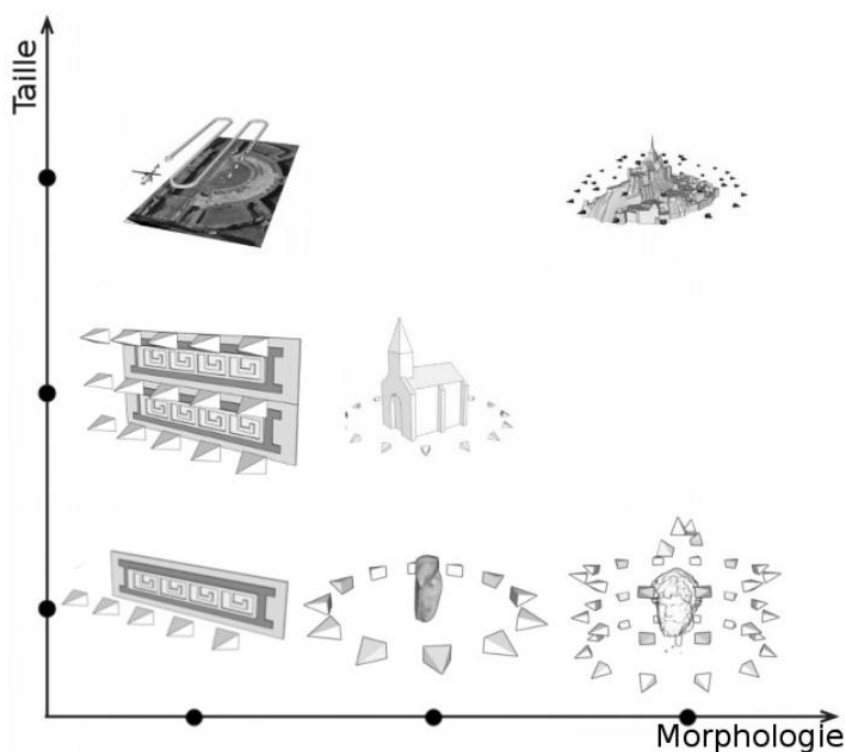


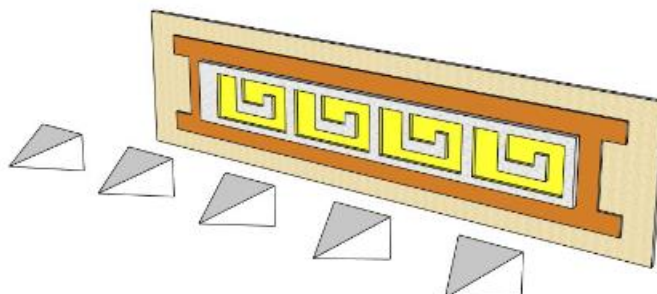
Figure 9 Plusieurs typologies égalent plusieurs protocoles
(Source : Culture 3D Cloud, p6)

Comme notre expérience portera sur l'étude d'une façade, nous allons effectuer une méthode de prise de vue linéaire en réalisant des photographies parallèles à la façade. Pour avoir une bonne qualité ainsi qu'une précision suffisante lors du traitement des données, il est recommandé d'avoir un recouvrement de 75% entre chaque image. Etant donné que l'on va utiliser un téléphone portable pour effectuer ce relevé, nous pourrions donc nous aider du système de grille présent dans celui-ci pour s'assurer que les prises de vues seront bien réalisées.



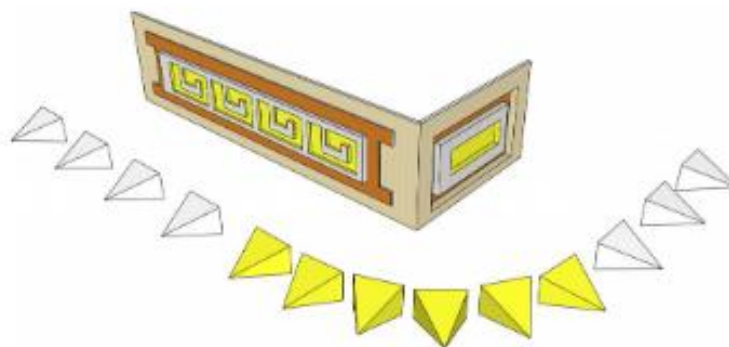
*Figure 10 Utilisation du quadrillage pour s'aider lors des prises de vues
(Source : Culture 3D Cloud, p19)*

Il suffit ensuite de réaliser plusieurs prises de vues en se déplacement latéralement le long de la façade, en veillant à garder la même distance entre nous et la façade. Etant donné que nous n'aurons à notre disposition que notre téléphone pour réaliser ce relevé, pour tout élément en hauteur auquel nous ne pourrions pas être parallèle lors de la prise de vue, il sera possible d'incliner le téléphone et de traiter ce paramètre dans le logiciel de photogrammétrie.



*Figure 11 Exemple de positionnement pour une prise de vue linéaire
(Source : Culture 3D Cloud, p20)*

Attention cependant, puisque nous auront également à traiter l'angle de notre bâtiment, il faudra s'assurer de toujours respecter cette règle de recouvrement. A savoir qu'en général, le relevé d'un angle peut être réalisé à l'aide de 6 photographies.



*Figure 12 Exemple de positionnement pour un angle
(Source : Culture 3D Cloud, p21)*

Enfin, il sera important de vérifier la météo avant de réaliser notre relevé puisque celle-ci pourra avoir un impact important sur sa qualité. En cas de pluie, la réflexion serait plus importante et la surface de la façade pourrait être plus compliqué à relever, de plus le focus pourrait avoir du mal à être effectuer et donc cela engendrerait des photos de mauvaises qualités. S'il y a la présence de végétation sur le site du relevé le vent pourrait également être problématique. Le mieux serait bien entendu que le ciel soit clair mais quand même couvert pour que la luminosité sur place ne soit pas trop élevée auquel cas, lors du relevé de la façade, nous pourrions avoir des problèmes avec les menuiseries extérieures.

A savoir qu'il est également possible de réaliser un relevé en format vidéo, cependant la qualité des images obtenues sera moindre, mais il pourra s'avérer utile en cas de besoin si nous manquons de photos lors du traitement des images. Puisque nous pourrions stopper la vidéo et avoir des prises de vues différentes de celles déjà en notre possession.

4.2 Géométrie

Il est également nécessaire sur place de procéder à un relevé géométrique afin de pouvoir correctement dimensionner les éléments lors de la modélisation. Pour réaliser se relevés nous utiliserons les outils habituels auxquels l'architecte peut avoir accès, comme un mètre, un mètre laser, une équerre, etc...



Figure 13 Exemples d'équipements utilisables pour un relevé

Lors de la réalisation de celui-ci, les données importantes à relevées seront par exemple le dimensionnement des baies, puisqu'elles correspondent aux vides présents dans les éléments porteurs. Le détail de leur composition sera quant à lui subjectif étant donné que ce qui nous intéresse dans cette étude est le calcul structurel final et non la composition précise de la façade.

Chapitre 5 : Modélisation

Une fois les données nécessaires obtenues lors de notre relevé in situ, il faut maintenant définir le traitement de celle-ci pour permettre la conception d'un modèle 3D. nous allons donc voir dans un premiers temps les logiciels concernés, puis dans un second temps le traitement des données à effectuer

5.1 Les logiciels

Dans sa thèse *La Photogrammétrie rapprochée au service de l'archéologie préventive*, Mariam Samaan propose de les classer en trois grandes catégories :

- « **Solutions web**

123DCatch [AUTODESK2014], Arc3D [VERGAUWENet VAN GOOL2006].

Ces solutions logicielles sont gratuites et simples d'utilisation. L'utilisateur envoie d'abord un jeu de données (images) sur un serveur, où sont réalisés les calculs. Une fois la reconstruction 3D terminée, l'utilisateur la reçoit sous forme d'un nuage de points dense. L'inconvénient de ces solutions est qu'elles fonctionnent comme une « boîte noire », c'est-à-dire qu'elles n'autorisent aucun contrôle ; par ailleurs, l'obligation de faire transiter les données par internet et de donner à la

société Autodesk un droit d'usage sur les images est considérée comme une limitation sérieuse par beaucoup d'utilisateurs.

- Solutions commerciales

Agisoft Photoscan², Smart3D Capture³, Photo Modeler Scanner⁴, Pix4D⁵.

Ces logiciels souvent très ergonomiques proposent une chaîne de traitements complètement intégrés. Les algorithmes de traitements n'étant pas forcément décrits, ils ne sont pas recommandés dans un contexte de recherche où l'on souhaite maîtriser tous les paramètres impactant la qualité du produit final.

- Solutions d'accès libre

Bundler [BUNDLER2014], PMVS [PMVS2014], MicMac [PIERROTDESEILLIGNY2012]. Ces logiciels sont développés dans la plupart des cas par des chercheurs universitaires. Ils sont gratuits et ouverts, ce qui permet aux utilisateurs de mieux contrôler les traitements. Ainsi, Bundler est implémentée par Noah Snavely, de l'Université Cornell de New York, tandis que PMVS est développée par Yasutaka Furukawa, de l'Université de Washington et par Jean Ponce de l'École Normale Supérieure (ENS) [SNAVELY et al. 2008]. PMVS utilise Bundler pour la phase de mise en place des images. MicMac « Multi-Images Correspondances, Methods for Automatic Correlation » est un logiciel développé à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), principalement par M. Pierrot-Deseilligny [PIERROTDESEILLIGNY2012]. Conçu à l'origine, en 2003, pour les applications cartographiques et les besoins internes de l'IGN, ce n'est que plus récemment (autour de 2009) qu'il s'oriente explicitement vers les applications de photogrammétrie terrestre et de relevé du patrimoine. Il est disponible en logiciel libre open source depuis 2007. » (M. Samaan, la Photogrammetrie rapprochée au service de l'archéologie préventive, 2016, p.37)

Pour faciliter la conception du modèle 3D, nous allons nous concentrer sur le logiciel METASHAPE AGISOFT. Comme décrit plus haut, celui-ci comporte une chaîne de traitement complètement intégrée et il très intuitif au niveau de l'utilisation, de plus il est possible de modifier le nuage de point denses dans le logiciel lui-même, ce qui nous évite d'avoir à utiliser un logiciel supplémentaire. A savoir que le fonctionnement décrit ci-après est sensiblement le même dans les autres logiciels malgré des particularités pour chacun d'entre eux.

5.2 Le traitement photogrammétrique

Concernant le traitement des images pour la production du modèle, la manière de procéder est sensiblement la même pour tous les logiciels de photogrammétrie. En effet, dans un premier temps il convient d'importer les fichiers qui vont servir de base pour la modélisation, ici par exemple les photographies réalisées sur site. Cette étape permet de faire un premier tri dans les photographies afin de savoir si celles-ci pourront être utilisées dans le logiciel ou non.

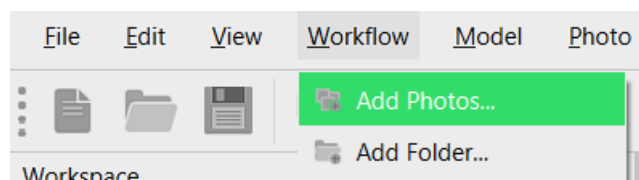


Figure 14 Ajout des photos dans Metashape
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Une fois les photos importés, nous pouvons passer à la phase d'alignement des photos, cette étape va permettre de repositionner les photos autour du futur modèle à générer. Durant cette étape, le logiciel va détecter les zones de chevauchement sur les différentes images tout en déterminant comment les images vont s'assembler. De plus, pour faciliter cette étape, il est préférable de prendre les photos dans l'ordre lorsque l'on réalise le relevé puisque l'ordinateur va généralement les placer en fonction de leur références, et si celles-ci se suivent, il sera alors plus facile pour la machine de les identifier. Il est également possible de gérer la précision lors cette étapes pour l'accélérer suivant la puissance de l'ordinateur. A la fin de cette étape, on obtient un nuage de points clairessemés.

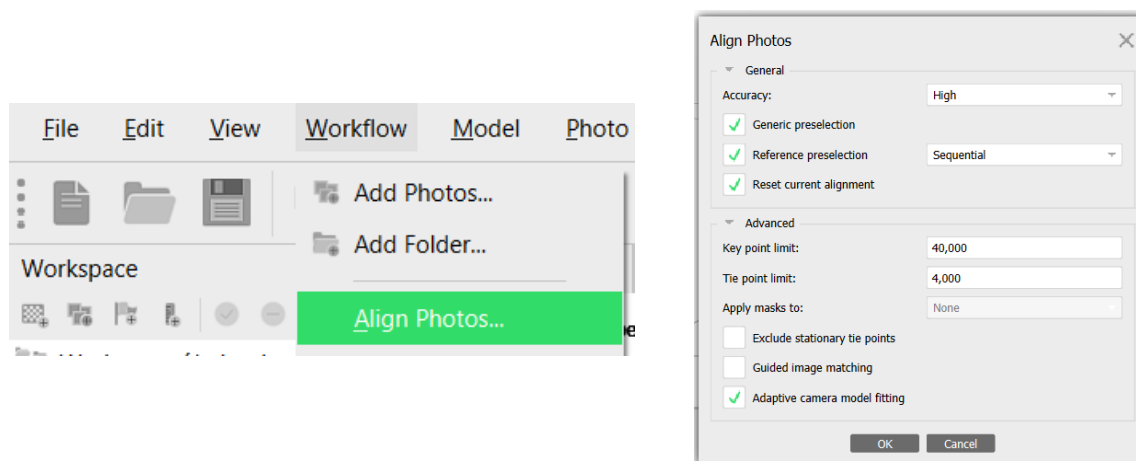


Figure 15 Alignement des photos + fenêtre de paramètre
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Lorsque les photos sont bien positionnées plusieurs choix s'offrent à nous. Le premiers est la création d'un nuage de point dense qui pourra par la suite être utilisé comme base pour réaliser un modèle structuré du bâtiment. Une fois le nuage de point dense obtenu, nous pouvons le corriger si certaines parties sont éronées. Lorsque le nuage de point parait satisfaisant, il est possible de l'exporter

au bon format, pour que celui-ci puisse être utilisé dans les autres logiciels, en général celui-ci sera au format « .e57 ».

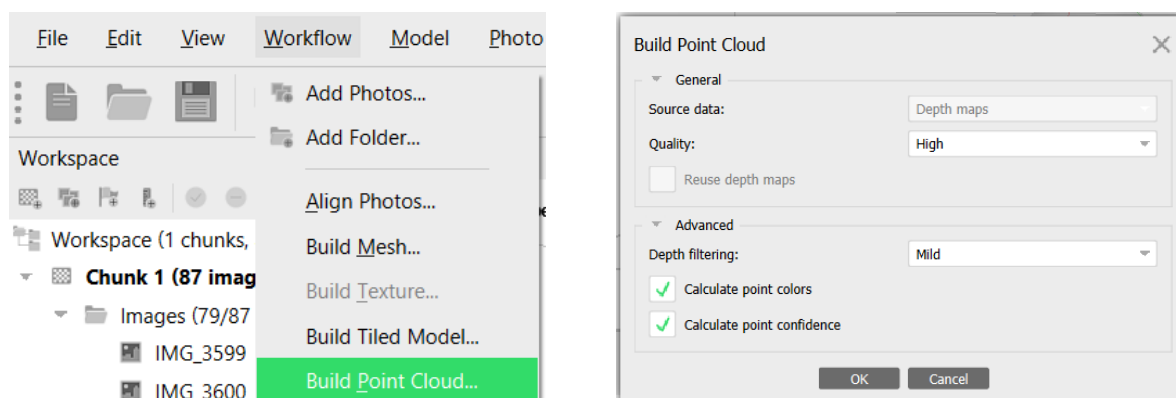


Figure 16 Création du nuage de point dense + fenêtre de paramètre
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Enfin, la dernière étape consiste à la création d'un maillage 3D de l'objet. Il est également possible de régler la qualité du maillage en faisant varier certains paramètres avant de lancer le processus comme la forme de maillage (triangulaire ou parallélogramme) ou encore le nombre d'élément qui le composera, ce qui influera également sur la taille du fichier ainsi que son post-traitement.

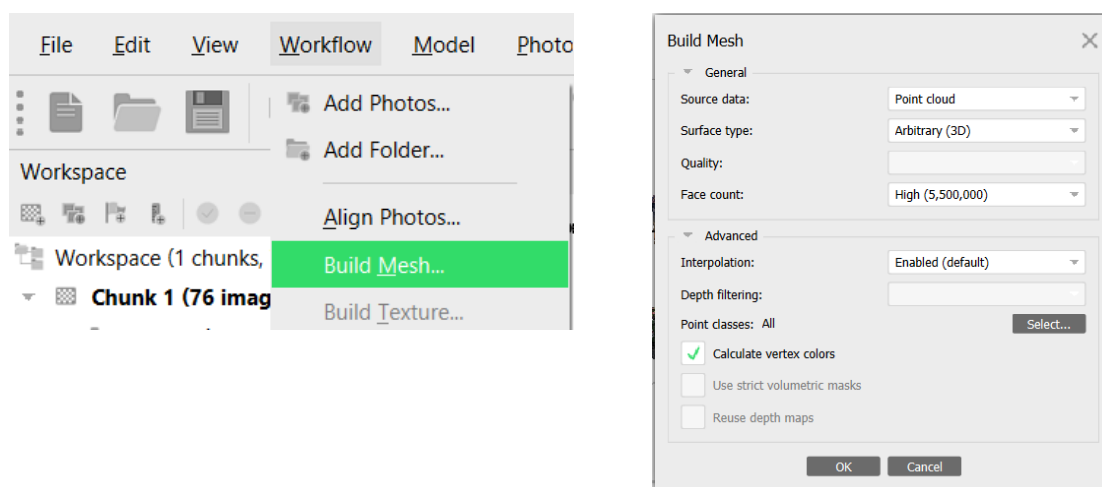


Figure 17 Création du mesh + fenêtre de paramètre
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

En effet, même si l'utilisation d'un logiciel de photogrammétrie comporte plusieurs étapes, il suffit généralement à l'utilisateur de n'appuyer que sur quelques boutons pour que la machine fasse ces tâches automatiquement. En revanche, l'objet maillé obtenu à la fin de toutes ces étapes nécessite généralement un post-traitement, où il faut nettoyer mais également remettre à l'échelle le maillage au besoin. Certains logiciels de photogrammétrie permettent d'effectuer directement ces modifications, cependant d'autres ne possèdent pas ces outils, il faut alors utiliser des logiciels externes pour réaliser cette post-édition.

5.3 Création du modèle 3D

Pour la création du modèle 3D, il faut à présent utiliser un logiciel métier dans lequel on importera le nuage de points dense préalablement obtenue pour que celui-ci serve de base à la modélisation. Ici nous allons utiliser ARCHICAD, puisque c'est un logiciel de modélisation avec lequel je travaille habituellement dans mes études d'architecture. La première étape de cette modélisation est l'importation du nuage de point dense. Pour ce faire, une fois le logiciel ArchiCAD lancé, il suffit de se rendre dans *Fichier>Interopérabilité>Importer un nuage de point*. Cette option permet d'importer un nuage de points dans ArchiCAD et de l'ajouter en tant qu'objet à la bibliothèque du logiciel.

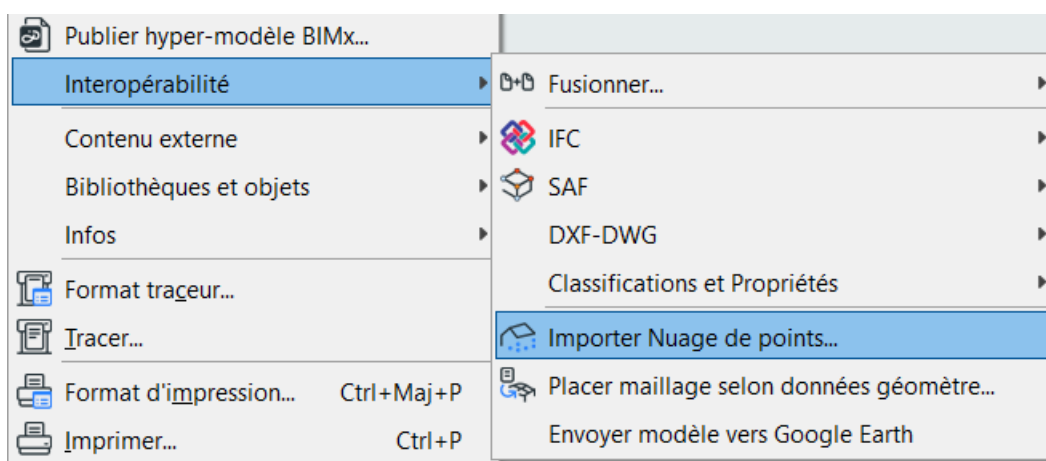


Figure 18 Importation du nuage de points dense sur ArchiCAD
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Une fois le nuage de point importé et correctement placé dans l'espace dessin nous pouvons à présent passer à la modélisation. Pour ce faire, nous allons nous servir des outils présent dans ArchiCAD prévus à cet effet : l'outil mur, dalle, poutre et toit. Le logiciel ArchiCAD possède une importante bibliothèque d'objet mais il est également possible de modifier ou d'en ajouter si besoin. A l'aide de plans, de coupes et d'élévations, nous allons pouvoir modéliser correctement le bâtiment en prenant comme base du dessin le nuage de point que nous venons d'importer. Pour faciliter la visibilité des ces différentes vues, l'outil *Trace* s'avère essentiel puisqu'il permet de faire apparaître sur un même onglet le plan, la coupe ou l'élévation qui correspond.

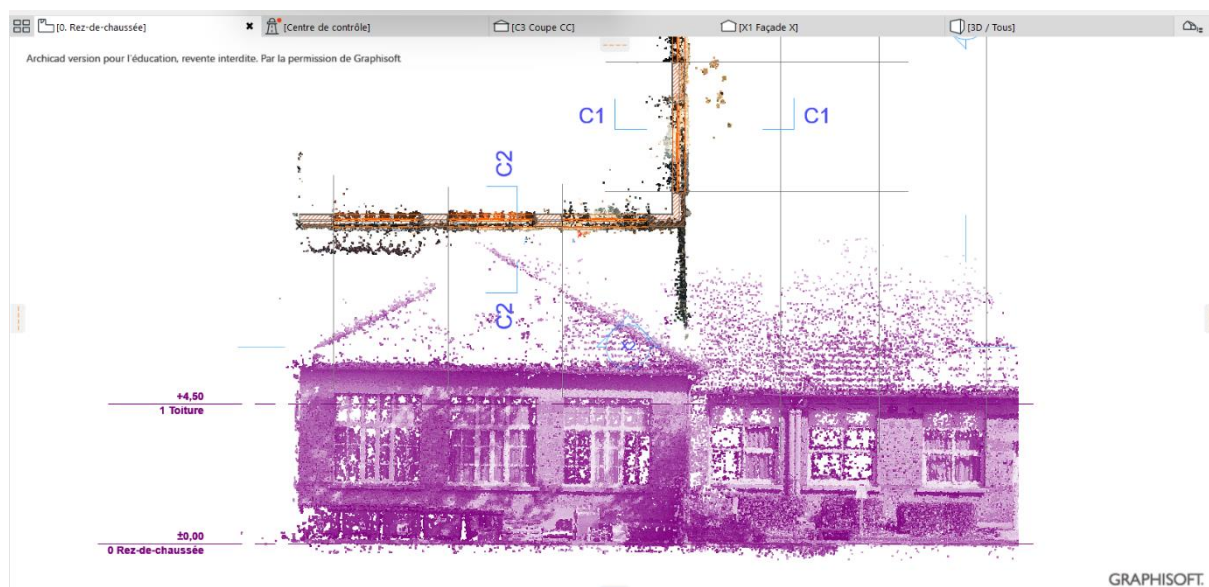


Figure 19 Dessin en plan avec trace de la façade Sud du bâtiment
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

De plus, pour générer facilement le modèle structurel sur ArchiCAD, il faut vérifier que les bonnes données soient rentrées dans les paramètres des objets, c'est-à-dire qui soient bien définis comme éléments porteurs. Ce qu'il est possible de vérifier dans les propriétés de l'objet.

Chapitre 6 : Calcul structurel

Dans ce chapitre je vais expliquer comment est réalisé un calcul structurel dans un logiciel de MEF

6.1 Les logiciels

A l'instar des logiciels de photogrammétrie, il existe également une multitude de logiciels capables de réaliser des calculs structurels. Dans ce mémoire nous allons utiliser le logiciel TEKLA Structures développé par TRIMBLE, puisque celui-ci est accessible gratuitement pour les étudiants durant une période d'un an avec toutes les fonctionnalités nécessaires pour notre projet.

En téléchargeant le logiciel Tekla Structures, deux autres sont également téléchargés : Tekla Structural Designer et Start Tedds. Chacun de ces trois logiciels à son propre intérêt. Le premier, Tekla Structures est un logiciel de modélisation structurelle, celui-ci sert à concevoir un modèle 2D ou 3D d'un projet avec une bibliothèque d'objet très complète et extrêmement poussée dans le détail structurel de chaque élément. Start Tedds quant à lui permet de réaliser des calculs sur des éléments prédéfinis comme les fondations ou encore les murs de soutènement en faisant varier les paramètres de ceux-ci, en revanche il n'est pas possible de modéliser sur celui-ci. Enfin le dernier, Tekla Structural Designer est logiciel qui permet de réaliser les calculs structurels.

6.2 Le traitement

Pour pouvoir réaliser un calcul structurel, il faut suivre un certain processus, pour ce faire, nous allons nous référer au guide technique proposé par Trimble *Modèle d'analyse* (2023). Dans un premier temps, il faut réaliser un modèle sur lequel l'analyse sera réalisée. Il est possible de le créer dans Tekla Structures ou alors d'en importer un réalisé sur un logiciel externe. Une fois celui-ci en notre possession, nous pouvons commencer à créer les cas de charges que nous allons utiliser pour les calculs. Il existe différents types de charges disponibles dans le logiciel, présentées dans le tableau suivant.

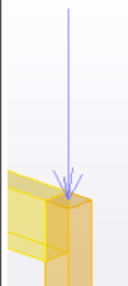
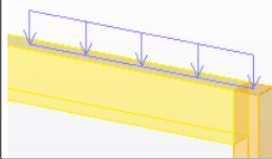
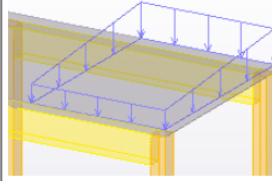
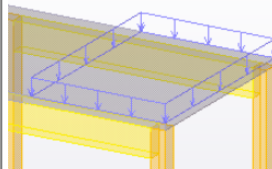
Types de charge	Description
Charge ponctuelle (page 25) 	Une force ponctuelle ou un moment fléchissant qui peut être attaché(e) à une pièce.
Charge linéaire (page 26) 	Une force ou une torsion répartie de façon linéaire. Par défaut, elle s'applique d'un point à un autre point. Vous pouvez également créer une charge linéaire avec des décalages par rapport aux points. Une charge linéaire peut être associée à une pièce. Son intensité peut varier de façon linéaire le long de la longueur chargée.
Charge surfacique (page 27) 	Une force répartie de façon linéaire délimitée par un triangle ou un quadrilatère. Il n'est pas nécessaire de relier la limite de la surface aux pièces.
Charge uniforme (page 27) 	Une force répartie de façon uniforme et délimitée par un polygone. Il n'est pas nécessaire de relier le polygone aux pièces. Les charges uniformes peuvent comporter des ouvertures.
Charge vent (page 29)	Charge surfacique définie par des facteurs de pression, sur la hauteur et sur tous les côtés d'un bâtiment.
Charge thermique (page 28)	<ul style="list-style-type: none"> Un changement de température uniforme qui est appliqué à des pièces spécifiques et provoque un allongement axial des pièces. Une différence de température entre deux faces d'une pièce qui provoque une courbure de la pièce.
Tension (page 28)	Un allongement ou retrait axial initial d'une pièce.

Figure 20 Tableau des différents types de charges disponibles dans Tekla Structures
(Source : *Modèle d'Analyse*, p.15-16)

La première étape avant de créer nos différentes charges consiste à définir le code de modélisation des charges, il s'agit du règlement que vont suivre les charges utilisées dans le logiciel. De manière standard celui-ci correspondra à l'Eurocode ce qui fait qu'il ne sera pas nécessaire de le modifier mais cela est tout à fait possible en cas de besoin. De plus si nous voulons créer un code unique pour une situation particulière, ceci est également envisageable.

Une fois le premier réglage terminé, il est à présent possible de créer un cas de charge. Ce cas de charge sera la définition de la charge que nous appliquerons par la suite. Il permet de définir le type de charge ainsi que sa direction. Il est possible de créer plusieurs cas de charges de charge différent mais il est important de noter que celui qui sera défini comme « courant » sera le cas utilisé lors de la création des charges.

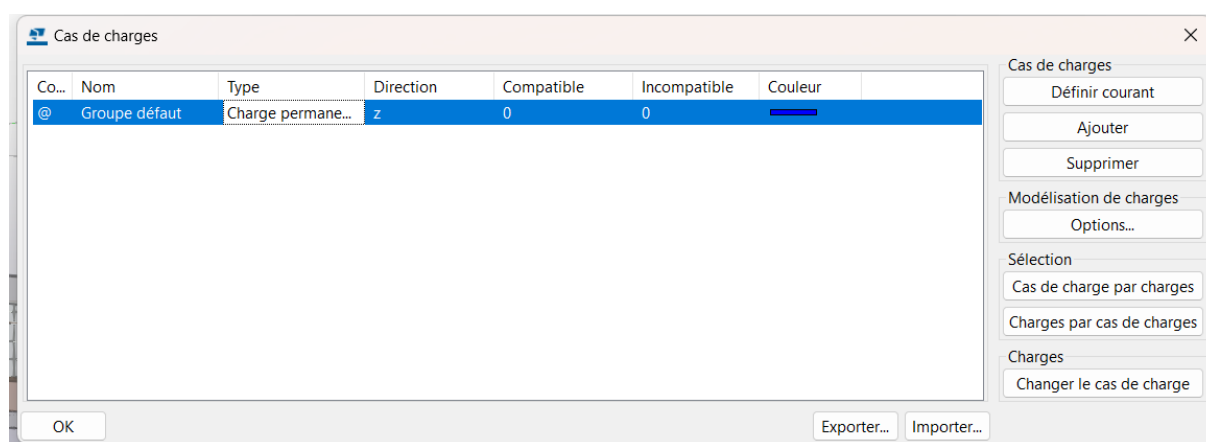


Figure 21 Fenêtre de création des cas de charge
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Une fois le cas de charge créé, nous pouvons commencer à modéliser nos charges. Il suffit à présent de sélectionner le type de charges que nous voulons créer et de la positionner à l'endroit souhaiter. Des aides aux niveaux des points d'accrochage sont également présentes pour nous permettre de les positionner le plus précisément possible. Ensuite, il est possible de modifier les propriétés d'une charge pour faire varier son intensité mais également la forme que celle-ci va prendre. L'intensité peut varier suivant trois types, chacun représenté par une lettre. P pour un effort agissant à un point donné, le long d'une ligne ou sur une zone, M pour les moments fléchissants sur une position ou le long d'une ligne et enfin T pour les moments de torsion agissant le long d'une ligne. La forme quant à elle ne correspond qu'aux charges linéaires et surfaciques et peut être modifier via les options suivantes.




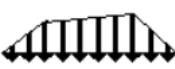
Option	Description
	L'intensité de la charge est uniforme sur toute la longueur sous charge.
	Différentes valeurs sont appliquées aux extrémités de la longueur sous charge. L'intensité change de façon linéaire entre les extrémités.
	L'intensité de la charge change de façon linéaire. Elle commence à zéro aux extrémités de la longueur sous charge et atteint une valeur donnée au milieu de cette longueur.
	L'intensité de la charge change de façon linéaire. Elle commence à zéro à l'une des extrémités de la longueur sous charge, passe par deux valeurs (différentes), puis revient à zéro à l'autre extrémité.

Figure 23 Options de forme des charges linéaires
(Source : Modèle d'Analyse, p.25)



Option	Description
	Quadrangulaire
	Triangulaire

Figure 22 Options de forme des charges surfaciques
(Source : Modèle d'Analyse, p.25)

Maintenant que les charges sont créées et correctement paramétrées, il faut créer un modèle d'analyse qui servira à isoler les éléments dont nous aurons besoin pour effectuer le calcul structural. Par la suite, c'est ce modèle ou du moins les éléments qui composent ce modèle qui seront exportés vers Tekla Structural Designer afin d'effectuer le calcul. Comme pour les cas des charges, il est possible de créer plusieurs modèles d'analyses suivant les besoins du projet, ce qui permet de rapidement isoler les éléments de travail.

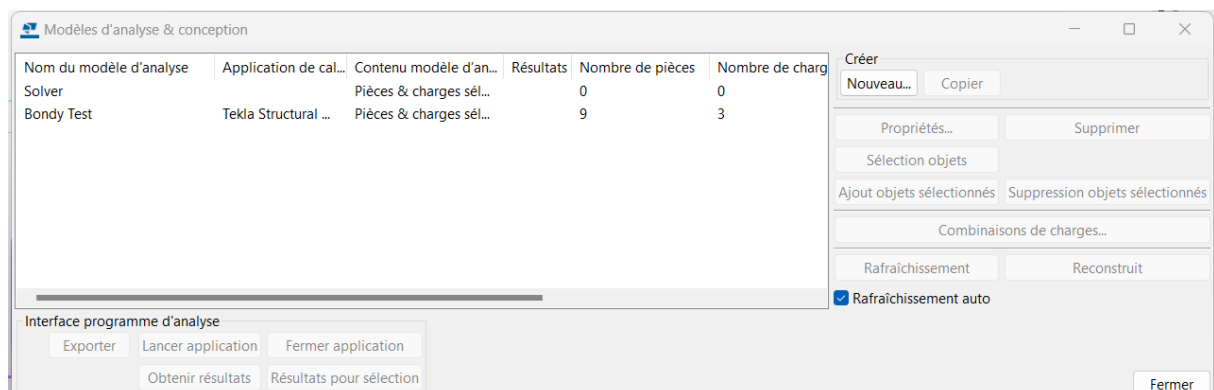


Figure 24 Fenêtre de création d'un modèle d'analyse
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Enfin, lorsque cette dernière étape est validée, il ne reste plus qu'à exporter le modèle d'analyse vers Tekla Structural Designer pour pouvoir effectuer le calcul. Le modèle peut également être exporté dans d'autres logiciels de calcul, mais comme celui-ci est disponible et qu'il existe des connections simplifiées entre les deux, cela permet de limiter le risque d'erreur lors des transferts. Il est également possible de n'exporter que le modèle physique, or il est conseillé d'exporter le modèle d'analyse qui assure une meilleure connectivité analytique ainsi qu'un modèle plus précis.

Dans Tekla Structural Designer, il est possible de réaliser plusieurs analyses structurelles ayant chacune ses particularités et importances, elles peuvent être réalisées séparément en sélectionnant seulement celle dont on a besoin ou alors toute en même temps. Comme nous ne cherchons pas de résultats très poussés dans ce mémoire mais simplement une approximation de la réalité, une simple analyse du 1^{er} ordre linéaire sera réalisée. Une fois l'analyse terminée, la fenêtre des résultats s'ouvre automatiquement et il est possible de naviguer dans celle-ci pour visualiser les différents résultats obtenus.



Figure 25 Menu déroulant des analyses disponibles dans Tekla Structural Designer
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

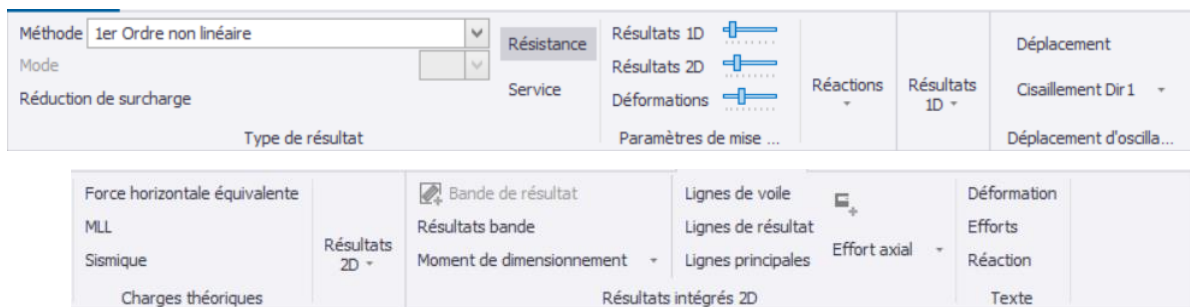


Figure 26 Menu déroulant des résultats dans Tekla Structural Designer
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

PARTIE III : EXPÉRIMENTATION

Dans cette dernière partie, je vais vous présenter l'expérience réalisée ainsi que le modèle obtenu afin de valider ou non notre hypothèse. Cette expérience a été effectuée sur un projet d'architecture en Master 2, où nous devions réaliser une étude structurelle d'une école à Bondy dans l'optique d'effectuer une réhabilitation ainsi qu'une extension de celle-ci. Je me suis limité à une zone précise du bâtiment en supposant que tout le bâtiment fonctionne de manière identique du point de vue structurel.



Figure 27 Ecole Pasteur de Bondy
(Source : Google Earth)

Zone étudiée

Chapitre 7 : Conception et utilisation du modèle

7.1 Relevés

Comme énoncé précédemment, la première étape pour cette modélisation consiste au relevé numérique de l'existant. Pour ce faire j'ai utilisé mon téléphone portable, un iPhone 8 Plus avec les caractéristiques suivantes :

- Résolution appareil photo => 4000 x 3000 pixels
- Ouverture => f/1.8
- Longueur focale => 28mm

J'ai donc réalisé 87 photos de la façade ainsi qu'une vidéo.



Figure 28 Extrait de quelques photos effectuées sur place

A quoi j'ai bien entendu ajouté des relevés géométriques tels que les mesures des ouvertures pour me permettre de vérifier que le nuage de point obtenu sera à la bonne échelle.

7.2 Modélisation

Une fois la partie relevé terminée, j'ai pu commencer à traiter mes photographies dans le logiciel Metashape Agisoft en suivant le protocole établi dans la partie précédente. Le logiciel étant très intuitif, chaque étape s'effectue de manière très spontanée. A commencé par l'import des photos, en se référant à l'onglet *Workflow*, c'est la seule option qui est disponible. Ensuite, je procède à l'alignement des photos.

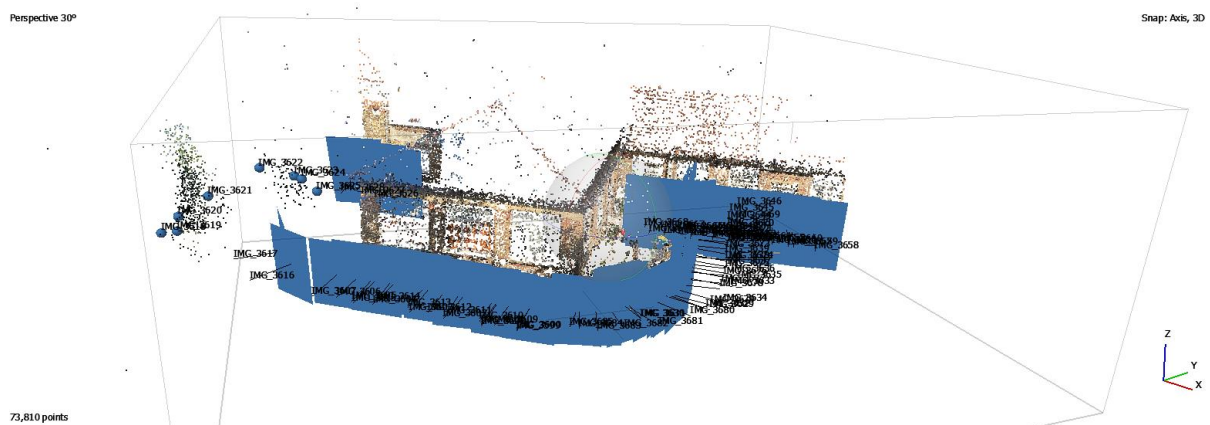


Figure 29 Nuage de points épars obtenu après alignement des photos
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Le nuage de points épars obtenu a permis de mettre en évidence des photos qu'il fallait supprimer. En effet comme nous pouvons le voir sur l'image suivante, un groupement de point se trouve délocaliser par rapport au reste du nuage, de plus certaines images se retrouvent isolées et n'ont pas d'intérêt pour le reste de la modalisation. J'identifie la zone 1 comme étant les photos réalisées ayant une partie obstruée par la végétation présente sur le site. La zone 2 quant à elle correspond au début du pavillon sur rue mais il ne m'est d'aucune utilité pour la suite de la modélisation. L'un des avantages de Metashape Agisoft est qu'il possède des outils pour directement modifier le nuage de points. Je décide de supprimer les photos, puis avec l'outil de sélection je sélectionne les zones de points pour ensuite les supprimer.

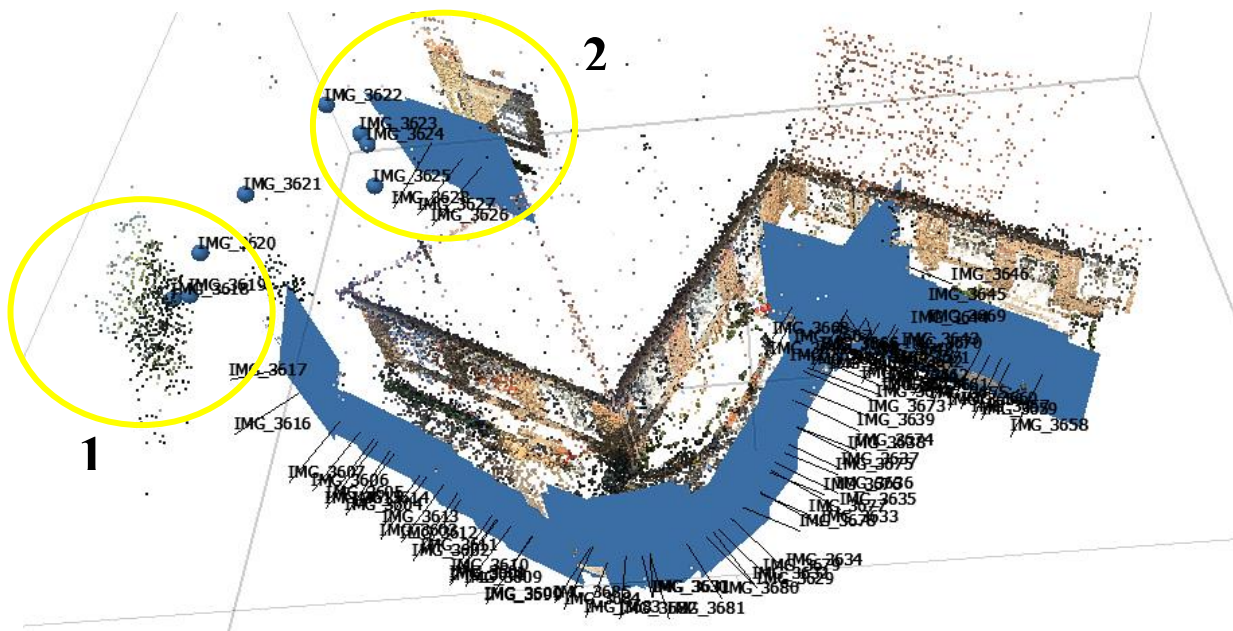


Figure 30 Zones de points incohérentes qu'il faudra supprimer
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Le nuage de points épars étant rectifié, je peux passer à l'étape suivante qui consiste à créer un nuage de points dense. Comme pour les étapes précédentes, je retourne dans l'onglet *Workflow*, et je lance la procédure *Build Point Model*. Les réglages rentrés par défaut pour cette opération nécessitant un temps très important pour la réalisation du nuage de point, je décide de l'annuler et d'en relancer une avec des exigences moindres, étant donné que le résultat attendu n'a pas besoin d'être extrêmement précis. Au bout de quelques minutes j'obtiens le nuage de points dense suivant. Je peux à présent vérifier que celui-ci est à la bonne échelle via les outils de mesure ainsi que les relevés effectués sur place. Je m'aperçois que le nuage de points dense obtenu est légèrement plus grand qu'il ne devrait l'être, alors j'utilise l'outil pour le mettre à l'échelle. Maintenant que le nuage de point dense a les bonnes proportions, je peux l'enregistrer au format « e54 » pour l'importer dans ArchiCAD.



Figure 31 Nuage de points dense qui sera exporter dans ArchiCAD
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Une fois le nuage de points dense importer sur ArchiCAD, je peux commencer la modélisation à proprement dite du modèle 3D. Pour ce faire les j'utilise les outils mur, dalle, poutre et toit mis à ma disposition dans le logiciel. Je m'assure dans les propriétés des objets que je crée que ceux-ci soient bien définis comme étant des éléments porteurs, puisque c'est ce qui me permettra de générer correctement par la suite le modèle analytique structurel.

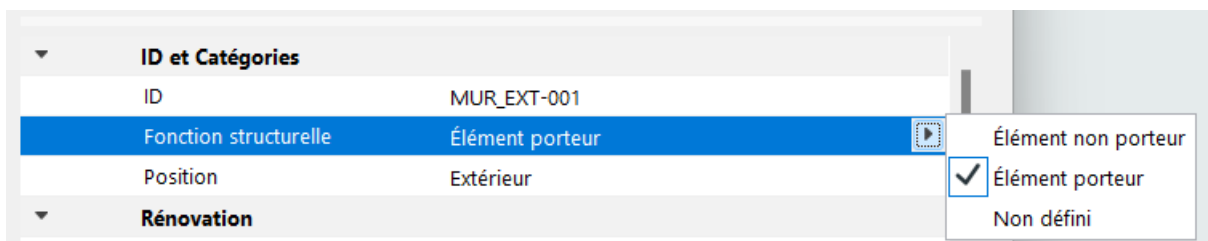


Figure 32 Choix de la fonction structurelle de l'objet
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Pour que la modélisation corresponde à la construction existante, je divise la façade en trois parties, la première correspond au mur du vide sanitaire réalisé en béton. La deuxième partie qui comprend les ouvertures est quant à elle en briques de terre cuite. L'ensemble est surplombé par une poutre également en béton sur laquelle vient reposer la toiture du bâtiment.



J'obtiens donc un modèle 3D composé de plusieurs éléments structurels. Pour ensuite générer le modèle analytique structurel, il faut effectuer un changement de profil dans le logiciel et utiliser celui de l'*Ingénieur structurel*. Ceci nous permet d'avoir accès aux outils de modélisation des ingénieurs, et plus particulièrement celui qui permet d'afficher le MAS.

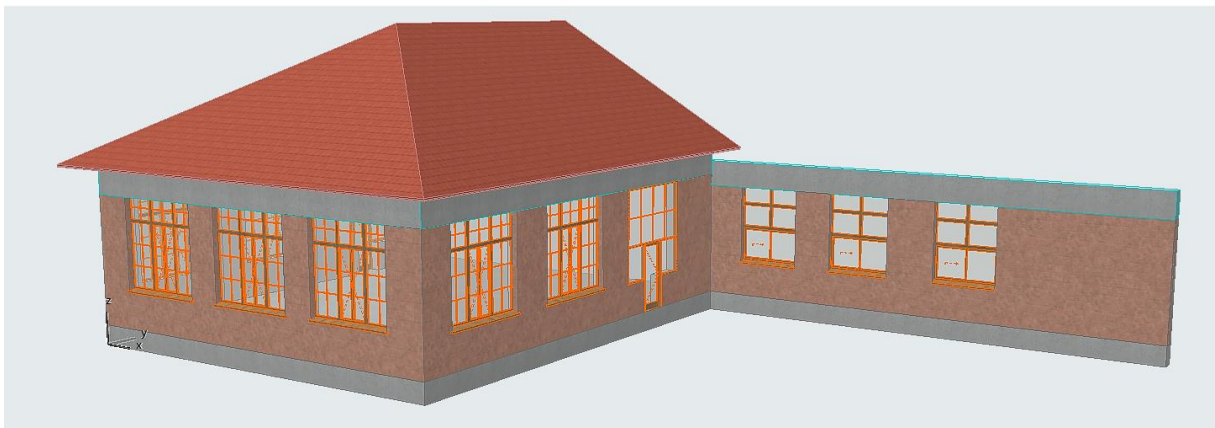


Figure 34 Modèle 3D texturé
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

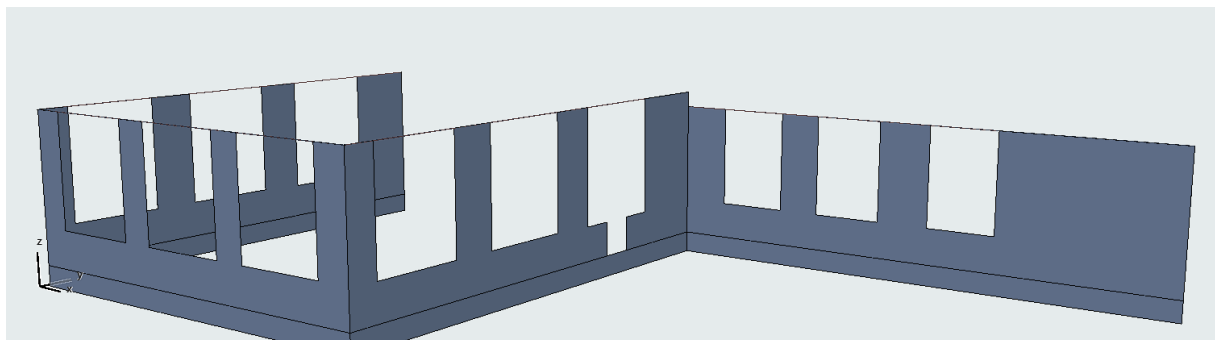


Figure 33 Modèle analytique structurel
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Cependant, même si le modèle a pu être généré correctement, il n'est pas forcément vrai. En effet il faut maintenant vérifier que tous les éléments structuraux soient bien connectés entre eux, autrement il faudra le corriger. Pour ce faire, la visualisation des *nœuds* est primordiale. Dans ArchiCAD, si les éléments sont correctement connectés, le nœud apparaît vert autrement celui-ci est rouge. Dans mon cas, la connexion entre la part basse et la partie centrale de ma façade étaient correctement raccordées, en revanche ce n'était pas le cas entre ma partie haute et ma partie centrale. Il faut donc rentrer dans les propriétés de l'objet afin de déplacer l'âme porteuse de la poutre en béton pour que celle-ci. En effet par défaut celle-ci est placée au milieu de l'objet alors que pour notre modélisation, le transfert des forces s'effectue sur la partie basse de la poutre, là où elle repose sur le mur.

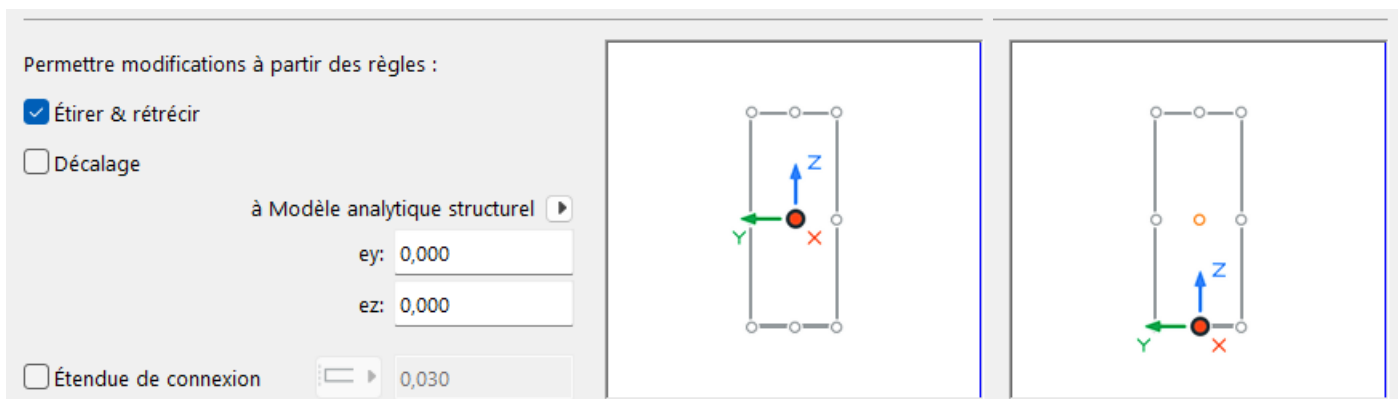


Figure 35 Image avant et après déplacement de l'âme porteuse de la poutre
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Le modèle analytique étant à présent correctement généré, nous pouvons à présent passer à l'exportation de celui-ci pour l'utiliser dans le logiciel Tekla Structures. Nous avons pu voir précédemment les options mises en place dans ArchiCAD pour permettre l'exportation du MAS. Ici, nous allons utiliser le format IFC afin d'exporter le modèle 3D. Au moment d'enregistrer le document au format IFC, il est possible de choisir directement le format correspondant à Tekla Structures puisque celui-ci est Déjà disponible dans la base de données d'ArchiCAD.

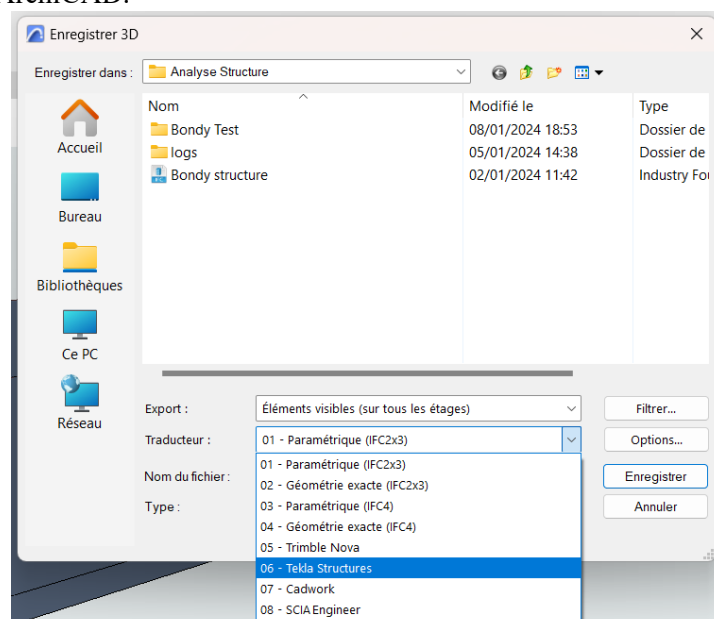


Figure 36 Enregistrement du fichier IFC
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

7.3 Calcul structurel

Je peux à présent passer sur le logiciel Tekla Structures afin d'effectuer le calcul structurel. La première étape consiste à importer le modèle généré sur ArchiCAD. Pour cela, il faut se rendre dans l'onglet *Importer* et sélectionner *Insérer un modèle de référence*. Nous pouvons alors voir le modèle apparaître.

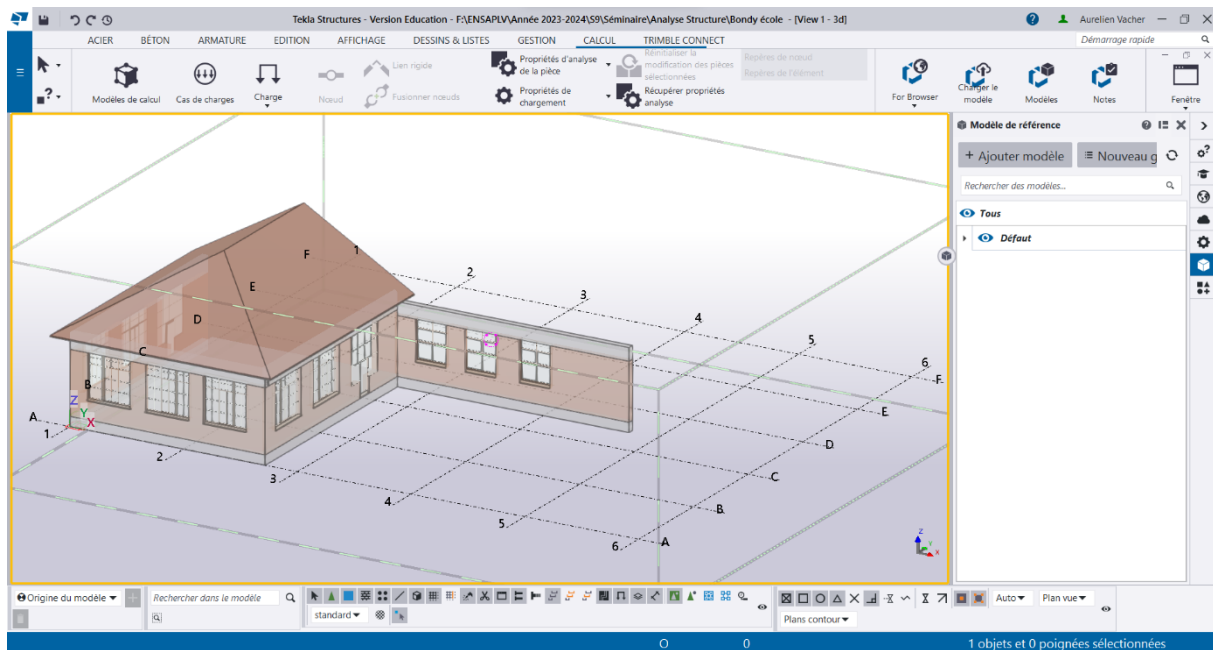


Figure 37 Importation du modèle dans Tekla Structures
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Ensuite je réalise le protocole établi dans la partie précédente, à savoir la création dans un premiers temps d'un cas de charge. Il correspond au poids propre de la façade puisque c'est elle que nous allons tester afin de connaître sa capacité portante. Une fois ses propriétés renseignées, nous pouvons à présent créer des charges linéaires qui viendront se positionner au-dessus de la poutre en béton. Enfin, lors de la création du modèle de calcul, il faudra uniquement sectionner la façade ainsi que le cas de charge qui lui est associé car les autres éléments ne seront pas nécessaires au calcul. Au moment d'ajouter uniquement la façade composée de mon mur en béton, mon mur en maçonnerie et ma poutre et béton, je me rends compte que ceux-ci font partie d'un seul et même objet qui comprend tout le modèle. Il faut donc dans un premier temps faire en sorte que chacun de ces éléments soient indépendants.

Il faut alors lancer le gestionnaire de modification et de conversion des IFC. Ensuite, il suffit de passer le statut de conversion de *pas de conversion* à *conversion*. Le logiciel va alors réaliser automatiquement une extrusion du modèle.

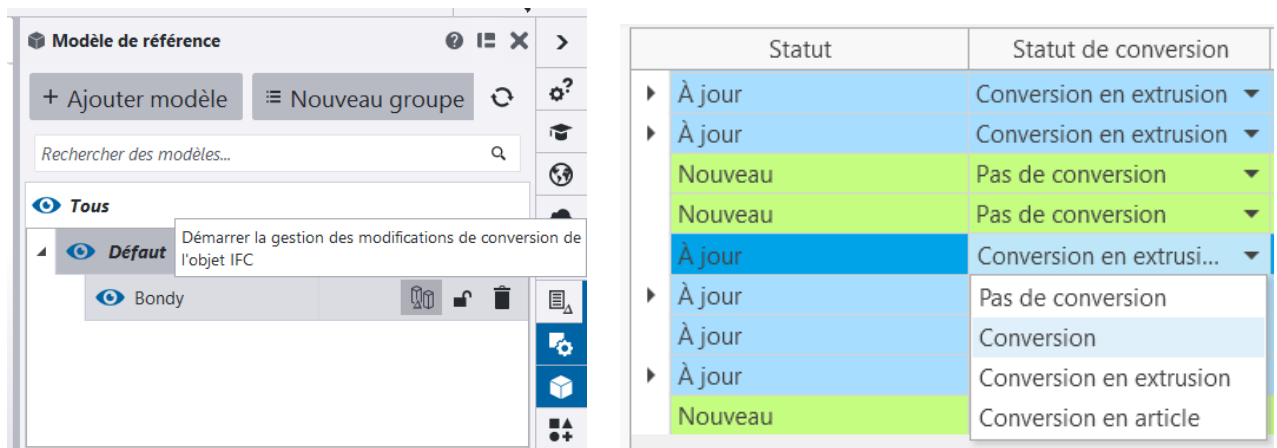


Figure 38 Fenêtre de gestion de conversion de l'IFC
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Une fois les éléments créés et ajoutés au modèle d'analyse, je peux l'exporter directement dans Tekla Structural Designer pour effectuer le calcul structural. Cependant, je me retrouve confronté à un nouveau problème, puisque mon cas de charge, ma poutre en béton, ainsi que la partie centrale de mon mur ne se sont pas correctement modélisés lorsque le fichier s'ouvre sur Tekla Structural Designer.

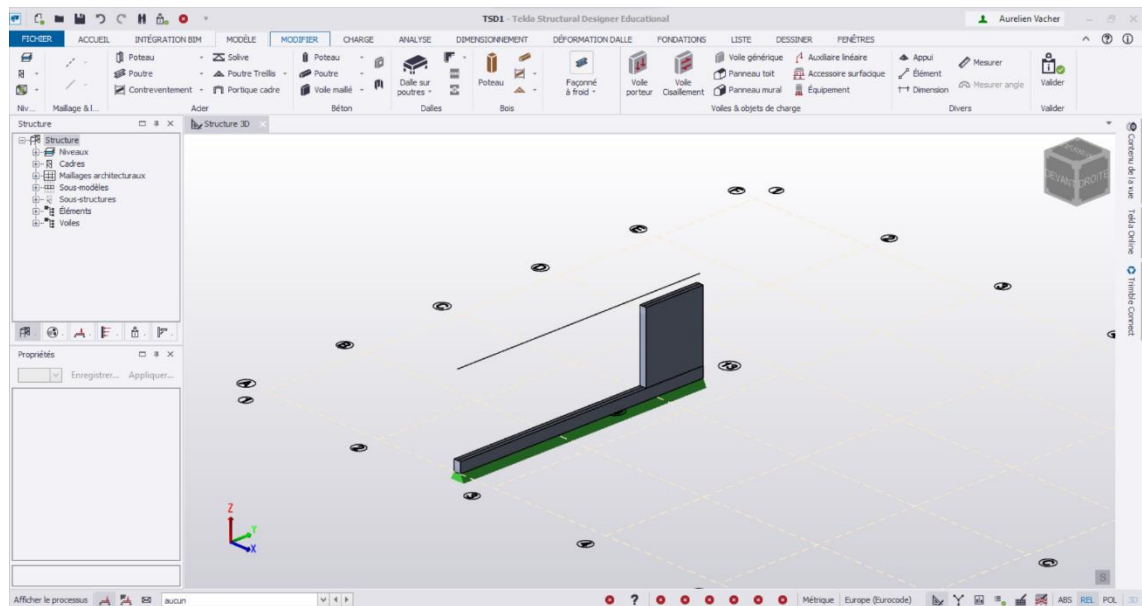


Figure 39 Problème lors de l'importation du modèle d'analyse
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Concernant la poutre en béton représenté ci-dessus par une simple ligne au-dessus du mur, après vérification du modèle sur Tekla Structures, je me suis aperçu que lors de la conversion automatique du modèle IFC dans le logiciel, celui-ci avait défini le matériau de construction comme du métal, donc une fois exporter dans Tekla Structural Designer, celle-ci s'est alors convertie dans le matériau préalablement défini dans Tekla Structures. Pour remédier à ce problème, il m'a donc fallu retourner sur Tekla

Structures et modifier dans les paramètres de l'objet son matériau. Cette manipulation effectuée, j'ai par la suite vérifié les matériaux des autres éléments et il s'est avéré que mes poutres en béton étaient les seules à ne pas avoir été converties dans le bon matériaux, ce que je n'explique pas encore aujourd'hui. Une fois le modèle réexporter, je me rends compte que cela n'a rien changer dans la modélisation sur Tekla Structural Designer. Je vérifie à nouveau les matériaux sur Tekla Structures, et je m'aperçois que mes changements n'ont pas été validé et ce parce qu'il faut valider le changement dans plusieurs fenêtres.

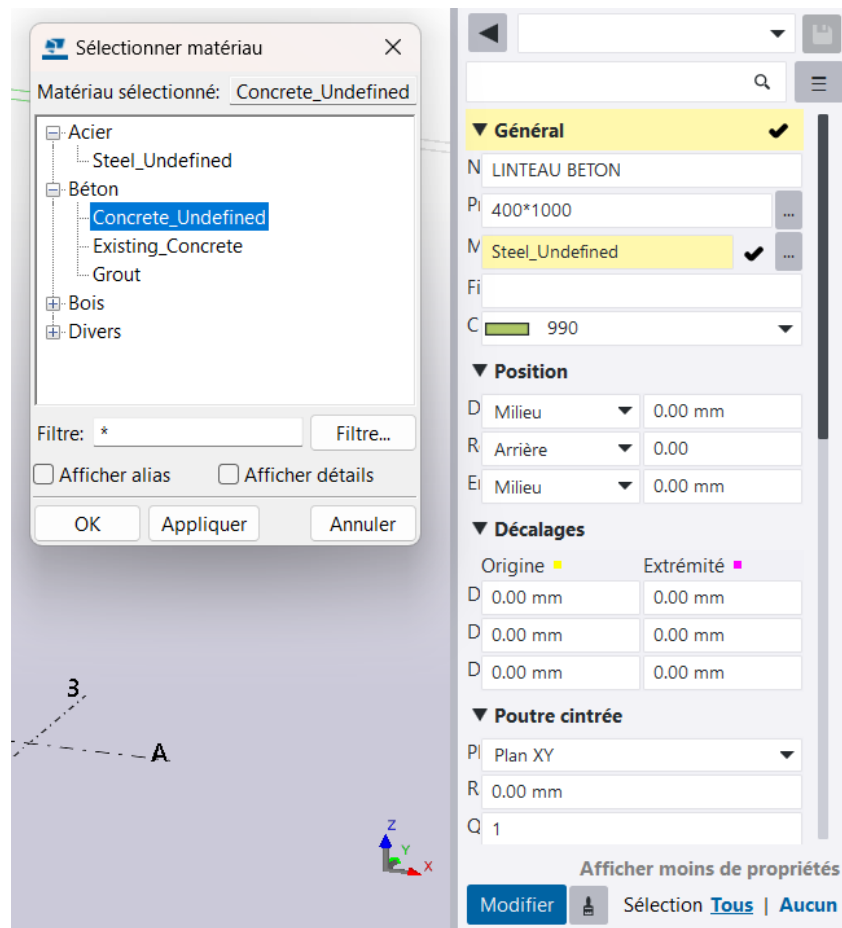


Figure 40 Fenêtres des paramètres pour le changement de matériau
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

En effet, lors du changement du choix du matériaux il faut valider dans un premier temps le matériau en lui-même sur la fenêtre qui s'est ouverte, ensuite il faut de nouveau valider ce choix en cliquant sur *modifier* en bas de la fenêtre de paramètre. Une fois ceci validé, le matériau est correctement remplacé. Je me suis également aperçu à cette étape que le choix des matériaux disponibles était limité, ceci étant dû au logiciel en lui-même qui est principalement utilisé pour les structures métalliques et béton, un point sur lequel je ne m'étais pas attardé jusqu'alors.

Cependant, ce premier réglage n'a pas permis de régler le problème du mur en brique qui n'apparaît qu'à moitié, ainsi que la disparition du cas de charges. Après plusieurs recherches infructueuses concernant ces deux sujets et sachant qu'il est également possible de créer des charges sur le logiciel

Tekla Structural Designer, je fais le choix d'exporter un des autres murs préalablement modélisés afin d'effectuer les calculs dessus en supposant que le bâtiment travail de manière uniforme.

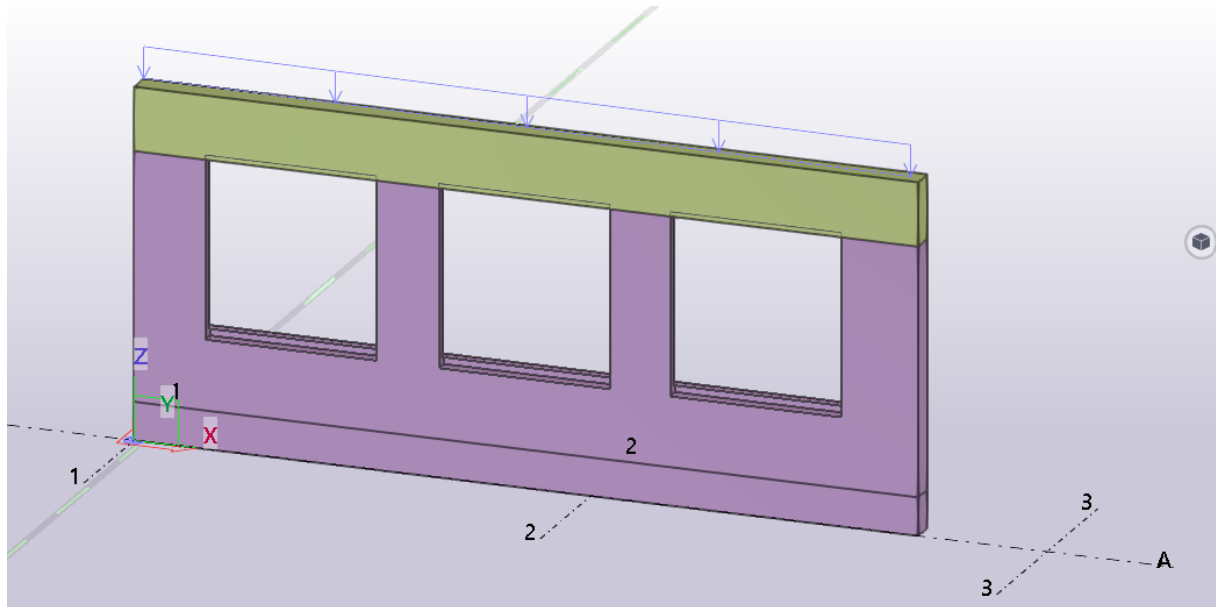


Figure 41 Façade Sud du bâtiment comprenant trois fenêtres
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Malgré le changement de mur, les ouvertures présentes dans Tekla Structures n'apparaissent toujours pas, cherchant uniquement à obtenir la capacité portante du mur, je créais un cas de charges qui correspond au poids propre de celui-ci et le met en place au-dessus pour qu'il symbolise la charge du mur. Pour réaliser le cas de charges, j'utilise soit le *CUR total* soit *CUR*, qui correspondent respectivement aux Charges Uniformément Réparties sur l'ensemble d'un élément ou de manière définie suivant la position choisie.



Figure 42 Différents types de charges proposés dans Tekla Structural Designer
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Par la suite je rajoute également le cas de charge symbolisant la dalle qui repose sur le mur ainsi qu'une charge *variable*, disponible parmi les 5 cas de charges présents dans Tekla Structural Designer, pour symboliser la charge de la toiture qui repose sur le bâti, afin de représenter au mieux toutes les charges que supporte actuellement le mur existant.

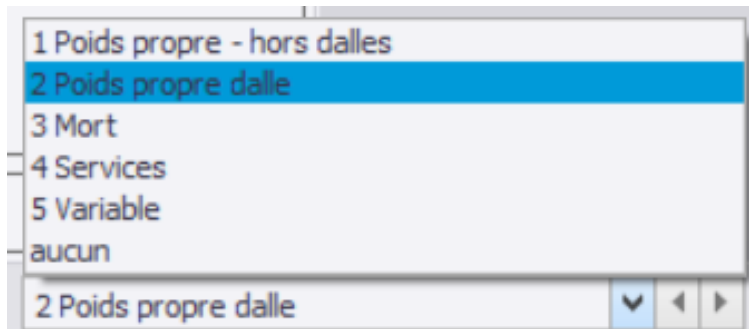


Figure 43 Cas de charges disponibles dans Tekla Structural Designer
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Une fois toutes les charges créées, il faut à présent créer une combinaison de charges comprenant toutes les charges qui serviront pour le futur calcul structurel. Dans la fenêtre qui s'ouvre, il faut choisir de *générer* une nouvelle combinaison et de sélectionner toutes les charges qui nous intéressent.

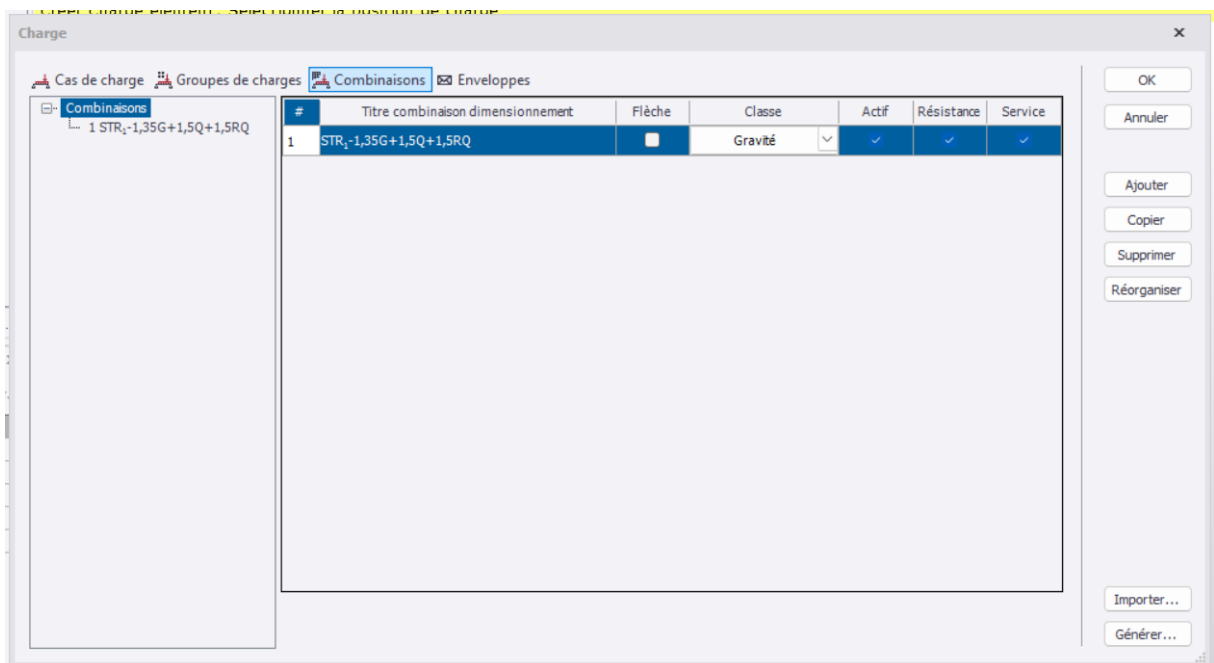


Figure 44 Fenêtre de combinaison de charge
(Source : Capture d'écran de l'auteur)

Une fois la combinaison de charges créée, il faut se rendre dans l'onglet *Analyse*, où plusieurs choix sont à notre disposition. Comme évoqué précédemment, ici nous cherchons simplement à obtenir la capacité portante du bâtiment existant, de ce fait une analyse du 1^{er} ordre linéaire sera réalisée. Lors de la réalisation du calcul, il est alors demandé de choisir la combinaison de charge à prendre en compte, ensuite le logiciel procède aux différents calculs structurels, enfin une nouvelle fenêtre comprenant les résultats s'ouvre automatiquement. On peut alors choisir de regarder plusieurs types de résultats suivant l'état de limite de services (ELS) ou état de limite ultime (ELU). Ici on choisit l'ELU puisque nous cherchons la charge maximum que celui-ci peut soutenir et plus précisément le *Moment* auquel celui-ci cède, ce qui nous permet de définir la charge maximale qu'il peut supporter. Cependant lorsque l'on

compare les résultats obtenus à ceux calculer lors de mon cours de projet en Master 1, je me rends compte que ceux obtenus sont complètement aberrants et ne concordent pas du tout. Ceci s'explique par les différents paramètres à prendre en compte lors de la réalisation de ces calculs dans le logiciel, en effet celui-ci étant très précis, il faut prendre en compte plusieurs points dont je n'ai pas forcément connaissances, pour que les résultats se rapprochent aux mieux de la réalité, de plus comme j'ai pu le constater durant ma phase de test, Tekla Structures et généralement utilisé pour l'analyse de structure en béton ou en acier alors que pour ma part, il s'agissait d'une construction mixte brique de terre cuite et béton. Je n'ai donc pas bien paramétré les matériaux correspondant aux différents objets composant mon mur, à noter que le mur principal de brique de terre cuite était d'ailleurs composé d'un double mur en brique. A quoi s'ajoute les différentes valeurs concernant le poids propre du mur ainsi que la charge de la dalle et de la toiture qui ne correspondaient peut-être pas avec celles que les ingénieurs avaient utilisé pour leurs propres calculs. J'ai donc pu réussir à effectuer les calculs via le modèle 3D, en revanche je ne peux pas les mettre en correspondance avec ceux effectués lors de mon Master 1 puisqu'il y a une trop grande incertitude concernant les différentes données utilisées.

CONCLUSION

A travers ce mémoire, j'ai pu m'initier à la modélisation via la photogrammétrie, et il est vrai que la conception du modèle 3D sur la simple possession de photos de l'existant ainsi que quelques relevés géométriques, fût assez simple et rapide. De part la faciliter de prise en main du logiciel de photogrammétrie, mais également les connaissances que je possédais déjà sur le logiciel ArchiCAD. La génération du modèle d'analyse structurel ainsi que son paramétrage furent également aisés via les outils à disposition dans ArchiCAD.

En revanche, lorsqu'il a fallu passer sur le logiciel Tekla Structures que je ne connaissais pas, j'ai eu beaucoup de difficulté à le prendre en main et à bien comprendre les outils à ma disposition. De plus le choix de ce logiciel s'est avéré problématique, étant donné qu'il sert principalement au calcul de structure métallique ou béton. J'ai fait face à plusieurs problèmes lors de l'importation de mon modèle dans Tekla Structural Designer, essentiellement dû à des défauts de paramétrages des différents éléments composant les murs du modèle générés sur ArchiCAD. De plus malgré plusieurs recherches, je reste encore avec des inconnus dont je n'ai pas trouvé la réponse, comme la disparition de la moitié du mur lors de l'ouverture du fichier sur Tekla Structural Designer. Malgré tout, j'ai quand même réussi à effectuer une analyse structurelle sur une partie du modèle. Cependant à cause d'une trop grande différence dans les données utilisées ainsi que des paramètres à rentrer que je n'avais pas pris en compte pour effectuer les calculs dans le logiciel, ceux-ci ne peuvent pas être mis en relation avec ceux qui ont été réalisés par les ingénieurs durant mon projet de Master 1.

Je reste du moins persuadé que la réalisation d'un calcul structurel sur le modèle obtenu par photogrammétrie est possible pour un étudiant, cependant par manque de connaissance sur le logiciel, je n'ai pas pu aboutir à des résultats convenables.

En revanche, même si cette méthodologie est possible, je ne pense pas que ce soit la plus efficace pour un étudiant en architecture, notamment par la complexité des logiciels de calcul structurel, ainsi que le manque de connaissances que nous possédons sur le sujet.

BIBLIOGRAPHIE

- Borne, E. (2021). L'Ordre et la réhabilitation. Entretien avec Christine Leconte. *L'Architecture d'aujourd'hui*. <https://www.larchitectureaujourd'hui.fr/lordre-et-la-rehabilitation-entretien-avec-christine-leconte/>
- Croce, P., Landi, F., Puccini, B., Martino, M., & Manco, A. (2022). Parametric HBIM Procedure for the Structural Evaluation of Heritage Masonry Buildings. *Buildings*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/buildings12020194>
- G3DC. (s. d.). *Guide pour la prise de vue photogrammétrique à destination de la plateforme C3DC*. http://www.tapenade.gamsau.archi.fr/Culture3DCloud_UsersGuideline.pdf
- Guerra de Oliveira, S., Biancardo, S. A., & Tibaut, A. (2022). Optimizing H-BIM Workflow for Interventions on Historical Building Elements. *Sustainability*, 14(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/su14159703>
- Pirchio, D., Walsh, K. Q., Kerr, E., Giongo, I., Giaretton, M., Weldon, B. D., Ciocci, L., & Sorrentino, L. (2021). Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling. *Engineering Structures*, 241, 112439. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112439>
- Samaan, M. (2016). *La photogrammetrie rapprochée au service de l'archéologie préventive*.
- Trimble. (2023). *Lancez-vous dans le calcul de structure*. https://support.tekla.com/dist/sxf/document/TS_ANA_2023_fr_Mod%C3%A8les_d%27analyse.pdf