

Conception et modélisation d'un bâtiment parasismique

Design and modelling of seismic resistant building

João Victor SOARES TEIXEIRA DE ARAUJO
Filière : Bâtiment 3C
Option : Structures
Année scolaire : 2022/2023

Tuteur-école : Sandrine JUSTER-LERMITTE

Entreprise d'accueil : Make Ingénierie

Tuteur de l'entreprise : Gabriel CHARPENTIER
Sekande Jennifer GANDONOU

Durée du stage : 27/02/2024 au 25/08/2023

Remerciements

Premièrement, je souhaite remercier les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce stage de fin d'études en particulier :

Monsieur Gabriel CHARPENTIER, fondateur et gérant de Make Ingénierie, pour m'avoir accueilli dans son entreprise et m'avoir suivi tout au long de mon stage, et surtout pour sa gentillesse, sa bienveillance, pour sa disponibilité et pour le partage de son expertise au quotidien.

Madame Sekande Jennifer GANDOUNOU, d'avoir accepté de suivre cette étude en tant que ma tutrice, en élaborant le projet central de ce rapport et en me guidant avec bienveillance tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Monsieur François BRUN, pour m'avoir accompagné et formé sur la conception de divers projets tout au long de ces 6 mois de stage.

Je remercie également Paul Micaelli, Elmahdi DADDI, Hakim ARAB, Mohamdi MAOULOUD et Kevin LOUIS pour leur accueil et pour m'avoir permis de progresser, en me transmettant leur expérience, et d'acquérir de nouvelles compétences grâce à leurs explications et leur patience.

Je remercie aussi Coralie FOURNIER, Baptiste SEZILLE et les architectes de l'Agence Française, cabinet d'architecture avec lequel l'entreprise partage ses locaux, pour leur soutien et leur accueil au bureau.

Je tiens à remercier la fondation brésilienne CAPES pour leur soutien financier sans lequel je n'aurais pas pu entreprendre mes études en France.

Je n'oublie pas non plus mes proches qui m'ont sans cesse soutenu dans mon parcours en France. Je remercie ma famille au Brésil, pour leur soutien indéfectible ; ma copine Leticia pour ses conseils ; et les amis de la résidence Jacques Restignat et de l'ESTP pour les bons moments vécus en France.

Enfin, je remercie l'école d'ingénieurs ESTP Paris pour toutes les connaissances qu'elle m'a apportées, qui ont facilité mon immersion dans cette entreprise.

Résumé

Ce rapport présente les missions principales que j'ai eu l'occasion de traiter au cours de mon stage de fin d'études au sein de l'entreprise Make Ingénierie, durant les six derniers mois. Bien que j'aie pu me familiariser aux bases du métier d'ingénieur en structures lors de mon stage de 2^{ème} année et que j'ai des connaissances acquises lors de ma spécialisation en Structure en 3^{ème} année, ce stage s'est avéré être une formation complémentaire axée sur la pratique et la réflexion approfondies nécessaires aux tâches d'un ingénieur débutant en structures.

Au cours de ce stage, j'ai travaillé sur divers projets allant de la réhabilitation à la construction neuve, et mobilisant différents matériaux tels que le bois, le métal et le béton armé. Ces projets comprenaient des missions de diagnostic, de surélévation, de conception et de dimensionnement ; ce qui m'a permis d'acquérir et de renforcer des compétences tout au long de cette période.

La problématique centrale de ce stage concerne la conception et la modélisation d'un bâtiment contraint aux règles parasismiques sur différents logiciels de calcul. La grande variété d'outils de calcul disponibles sur le marché est justifiée par les limitations de paramétrage propres à chaque logiciel. En effet, même si les outils de calcul respectent avec les mêmes normes, il est fréquent d'obtenir des résultats distincts en confrontant la modélisation sur deux logiciels différents.

Dans le but d'avoir une compréhension plus approfondie des subtilités de modélisation et d'avoir une meilleure appréhension des méthodologies de dimensionnement adaptées à chaque logiciel, ce rapport se propose de réaliser une comparaison entre deux outils de calcul – Arche Ossature et Robot – afin d'identifier les avantages et inconvénients de chacun et de proposer à l'entreprise une méthode de travail adaptée à chaque logiciel.

Au cœur de ce rapport se trouve l'étude d'un projet parasismique situé à Lille. Le projet en question concerne une tour de 10 étages, comprenant 37 logements sociaux et une crèche au rez-de-chaussée. Ainsi, à travers l'exploration de ce projet et la comparaison multicritère entre Arche Ossature et Robot, cette étude cherche à guider l'entreprise dans le choix du meilleur outil pour l'étude des structures nécessitant un traitement parasismique.

Ce stage a été une opportunité unique pour comprendre les missions d'un ingénieur au sein d'un bureau d'études structure. L'utilisation de plusieurs logiciels pour divers projets m'a permis de consolider et d'étendre les connaissances acquises à l'ESTP, tout en développant une perspective plus concrète du métier. J'ai également eu l'occasion de m'intégrer dans un environnement de travail collaboratif avec d'autres acteurs du domaine de la construction.

Mots clés : *ingénieur structure, génie parasismique, conception, dimensionnement, réhabilitation, surélévation, Robot Structural Analysis, Arche Ossature, calcul de structure.*

Abstract

This report presents the main tasks I had the opportunity to work on during my internship at Make Ingénierie, over the last six months. While I had already been able to acquaint myself with the basics of structural engineering during my previous internship and I had knowledge gained from the Structures specialization I did in my third year, this internship proved to be a supplementary training focused on practical experience and in-depth reflection regarding the tasks of a novice structural engineer.

Throughout this internship, I worked on various projects ranging from rehabilitation to new constructions, that involved a wide array of materials such as timber, steel, and reinforced concrete. These projects included tasks related to diagnosis, expansion of existing buildings and design, which allowed me to acquire skills throughout this period.

The principal issue of this internship relates to the design and modeling of a building that is subject to seismic code – using different design software. The wide variety of calculation tools available on the market is justified by the specific parameter limitations of each software. Indeed, even if the calculation tools are submitted to the same standards, it is common to obtain different results when comparing modeling on two different software.

With the aim of acquiring a deeper understanding of the intricacies of modeling and of having a better grasp of the suitable design methods for each software, this report aims to carry out a comparison between two calculation tools – Arche Ossature and Robot Structural Analysis – in order to figure out their strengths and weaknesses, and to offer some kind of software-focused guide to the company.

At the heart of this report lies the study of a seismic designed building located in Lille. Said project involves a 10-storey tower comprised of 37 housing units and a nursery on the ground floor. Thus, through the project analysis and the in-depth comparison between Arche Ossature and Robot, this report seeks to add value to the company in selecting the best tool for the study of structures requiring seismic analysis.

This internship was a unique opportunity to understand the responsibilities of an engineer in a structural consulting firm. The use of multiple software for various projects allowed me to consolidate and expand the knowledge acquired at ESTP, while developing a practical perspective of the profession. I also had the chance to integrate into a collaborative work environment with other stakeholders in the construction industry.

Keywords : *Structural engineer, seismic engineering, structural conception, structural design, rehabilitation, vertical extension, Robot Structural Analysis, Arche Ossature.*

Glossaire des termes régulièrement employés dans le présent rapport

MOA : Maitrise d’Ouvrage ;
MOE : Maitrise d’œuvre ;
BET : Bureau d’étude ;
BC : Bureau de Contrôle ;
NdC : Note de Calcul ;
APS : Avant-Projet Sommaire ;
APD : Avant-Projet Détaillé ;
AVP : Avant-projet ;
PC : Permis de construire ;
PRO : phase Projet ;
DCE : Dossier de Consultation des Entreprises ;
CCTP : Cahier de Clauses Techniques Particulières ;
EXE : phase d’Exécution ;

RDM : Résistance des matériaux ;
BTP : Bâtiment et travaux Public ;
BA : Béton Armé ;
ELS : Etat Limite de Service
ELU : Etat Limite Ultime
ELA : Etat Limite Accidentelle

Logiciels :

Revit : Autodesk Revit
Robot : Autodesk Robot Structural Analysis
Arche : Graitec Arche Ossature

Remerciements	2
Résumé	3
Glossaire des termes régulièrement employés dans le présent rapport	5
Introduction	9
I. Présentation de l’entreprise d’accueil	10
A. <i>Environnement actuel</i>	10
B. <i>Activités de l’entreprise</i>	11
C. <i>Développement durable</i>	11
D. <i>Positionnement du stage dans le contexte de l’entreprise</i>	13
II. Conception et dimensionnement des structures – Modélisation sous Arche Ossature et Robot	15
A. <i>Projet MLC : conception de deux bâtiments R+2 avec un niveau de sous-sol à Montigny-les-Cormeillès</i>	15
1. Présentation du projet.....	15
2. Processus de conception	16
B. <i>Projet RDP : surélévation d’un immeuble au 50 rue du Nord à Paris</i>	20
3. Présentation du projet.....	20
4. Justification de la surélévation en bois.....	21
5. Conception et modélisation	23
C. <i>Projet divers</i>	27
1. RDP – Conception d’un bâtiment de bureaux à rue de Paris (APS).....	27
2. DQE – Conception d’un parking à Brest (Concours)	27
3. HTC – Ouverture de mur porteur à l’avenue Hoche à Paris (EXE).....	27
4. PDL – Surélévation à rue Philibert Delorme à Paris (EXE)	27
5. LIL – Ouverture de mur porteur aux Lilas (EXE).....	27
III. Analyse sismique	28
A. <i>Génie Parasismique</i>	28
B. <i>Conception parasismique</i>	29
C. <i>Procédures d’une analyse sismique</i>	30
IV. Outils d’analyse	32
A. <i>Arche Ossature</i>	32
1. Modélisation.....	32
2. Calcul.....	35
3. Analyse modale et dynamique	36

B.	<i>Robot Structural Analysis</i>	38
1.	Modélisation.....	38
2.	Méthode des éléments finis	39
3.	Analyse modale.....	41
4.	Analyse dynamique.....	42
C.	<i>Méthode des forces latérales</i>	43
V.	Projet Lille Metropolitan Square : Conception Parasismique	44
A.	<i>Hypothèses</i>	46
1.	Géométrie.....	46
2.	Charges	46
3.	Matériaux.....	46
B.	<i>Hypothèse sismique</i>	46
1.	Examen préalable de la structure du bâtiment.....	47
2.	Définition des éléments sismiques	48
3.	Choix du type de mur	49
4.	Coefficient de comportement	50
5.	Méthode des forces latérales	51
VI.	Etude du projet à l'aide du logiciel Arche	52
A.	<i>Analyse Modale</i>	52
B.	<i>Répartition des efforts aux porteurs</i>	52
C.	<i>Difficultés rencontrées</i>	53
VII.	Etude du projet à l'aide du logiciel Robot	55
A.	<i>Analyse modale</i>	55
B.	<i>Répartition des efforts</i>	57
C.	<i>Déplacements</i>	59
D.	<i>Difficultés rencontrées</i>	60
VIII.	Bilan comparatif	62
A.	<i>Analyse modale</i>	62
B.	<i>Exploitation des résultats</i>	62
C.	<i>Bilan final</i>	63
IX.	Conclusion	65
X.	Annexes	67
A.	<i>Projet MLC :</i>	67
1.	Minutes structures	67
2.	Minute synthèse structure et fluides	71
B.	<i>Projet Lille Metropolitan Square</i>	72
1.	Minutes structures	72

2. Tableaux de calcul du centre de torsion.....	74
3. Analyse des efforts unitaires aux voiles au RDC.....	75
4. Elévations des éléments sismiques	76
5. Justification des murs conventionnels	78
XI. Bibliographie.....	79
XII. Liste des figures	80

Introduction

Chaque année, les séismes font des ravages impactant la société sur tous les plans, aussi bien sur le plan social, environnemental et économique. En effet, l'effondrement d'un ouvrage peut engendrer de nombreux sinistres et ôter la vie de centaines, voire de milliers d'individus. Bien que ce soit un phénomène qui se répète depuis la nuit des temps, ce n'est que depuis les dernières dizaines d'années que le domaine de l'ingénierie structurelle a développé des démarches et méthodes efficaces pour faire face aux séismes. L'ingénierie parasismique permet de concevoir et réaliser des ouvrages protégeant les vies humaines, en étudiant les effets des événements sismiques sur la stabilité et la rigidité des structures.

Bien que l'émergence de l'ingénierie parasismique puisse sembler récente dans l'histoire de l'ingénierie structurelle, la nécessité d'une étude spécifique parasismique est due au fait que les efforts sismiques demandent une démarche d'analyse particulière. Plusieurs spécificités sont à prendre en compte lors d'une étude sismique.

L'avancement significatif de la capacité de calcul des ordinateurs dans les années 70 a engendré un raffinement des calculs sismiques. La résolution rapide d'équations différentielles et matricielles, par le biais de logiciels informatiques, a permis de prendre en compte un large éventail de variables nécessaires à la création de modèles parasismiques représentatifs. Les deux exemples de logiciels les plus utilisés en France sont Robot Structural Analysis et Arche Ossature.

Au cours de mon stage de fin d'études, j'ai occupé le poste d'assistant ingénieur structures. Pendant les six derniers mois, j'ai réalisé des études de conception et de modélisation pour plusieurs projets, allant du dimensionnement structurel à la modélisation de maquettes numériques. En parallèle, j'ai travaillé sur le dimensionnement structurel de diverses missions, tant pour des projets de réhabilitation que de nouvelles constructions, en phase de conception et d'exécution. Ces missions ont englobé la conception de plans de coffrage et de ferrailage pour des ouvrages en béton armé, ainsi que la création de plans d'exécution pour des charpentes en bois ou en métal.

Compte tenu des missions qui m'ont été confiées et du thème de mon stage, j'ai choisi d'étudier la conception et la modélisation d'un bâtiment en béton armé soumis aux normes parasismiques.

Ce rapport de stage s'ouvre sur la présentation de l'entreprise d'accueil, mettant en contexte l'environnement professionnel dans lequel j'ai évolué au cours de ces six mois. Par la suite, je détaille les projets sur lesquels j'ai eu l'opportunité d'approfondir mes compétences d'ingénieur structures.

Dans une optique de progression logique, le rapport aborde ensuite les concepts de l'analyse sismique, en introduisant ainsi l'un des sujets majeurs abordés dans ce mémoire.

Le quatrième chapitre se penche sur les deux logiciels qui ont été utilisés pendant le déroulement du stage. Ces outils ont été confrontés dans les étapes de modélisation et d'exploitation des résultats dans le projet central de ce rapport.

Par la suite, les chapitres cinq à huit se concentrent sur le projet qui a été à l'origine de ce rapport. Le chapitre cinq présente le projet en question, en exposant ses caractéristiques. Les chapitres six et sept mettent en lumière les résultats obtenus sur chacun des logiciels, tandis que le huitième chapitre dresse un bilan comparatif entre ces deux approches.

I. Présentation de l'entreprise d'accueil

L'entreprise Make Ingénierie est un bureau d'études pluridisciplinaire spécialisé dans les études de structures que ce soit en ouvrage neuf ou en réhabilitation. L'entreprise a été fondée en 2015 par Gabriel Charpentier, ingénieur diplômé des Arts & Métiers. Le siège social de l'entreprise est situé au 62 rue Planchat, 75020 Paris.

M. Gabriel Charpentier possède une solide expérience professionnelle de 10 ans établie au sein de différentes entreprises du domaine de l'ingénierie structurelle. Fort de cette expertise et animé par une passion pour son métier, il a pris la décision de créer son propre bureau d'études.

Au fil des années, Make Ingénierie a su gagner en réputation et en notoriété grâce à son professionnalisme, son engagement envers l'excellence et sa capacité à relever les défis les plus complexes. L'équipe d'ingénieurs travaille en étroite collaboration avec les architectes, les entreprises et les maîtres d'ouvrages pour réaliser des projets variés, en mettant l'accent sur la qualité des réalisations, le respect des normes réglementaires et la consonance avec l'état de l'art.

Make Ingénierie s'efforce également de rester au courant des nouvelles tendances et des enjeux environnementaux. L'entreprise est soucieuse de l'impact carbone des bâtiments et capable de proposer des solutions écologiquement responsables pour contribuer à la réduction des émissions de CO2 dans le secteur de la construction.

A. Environnement actuel

A ce jour, l'entreprise compte avec une équipe variée composée par sept salariés, un architecte-projeteur et trois stagiaires. Ci-dessous l'organigramme de l'entreprise :

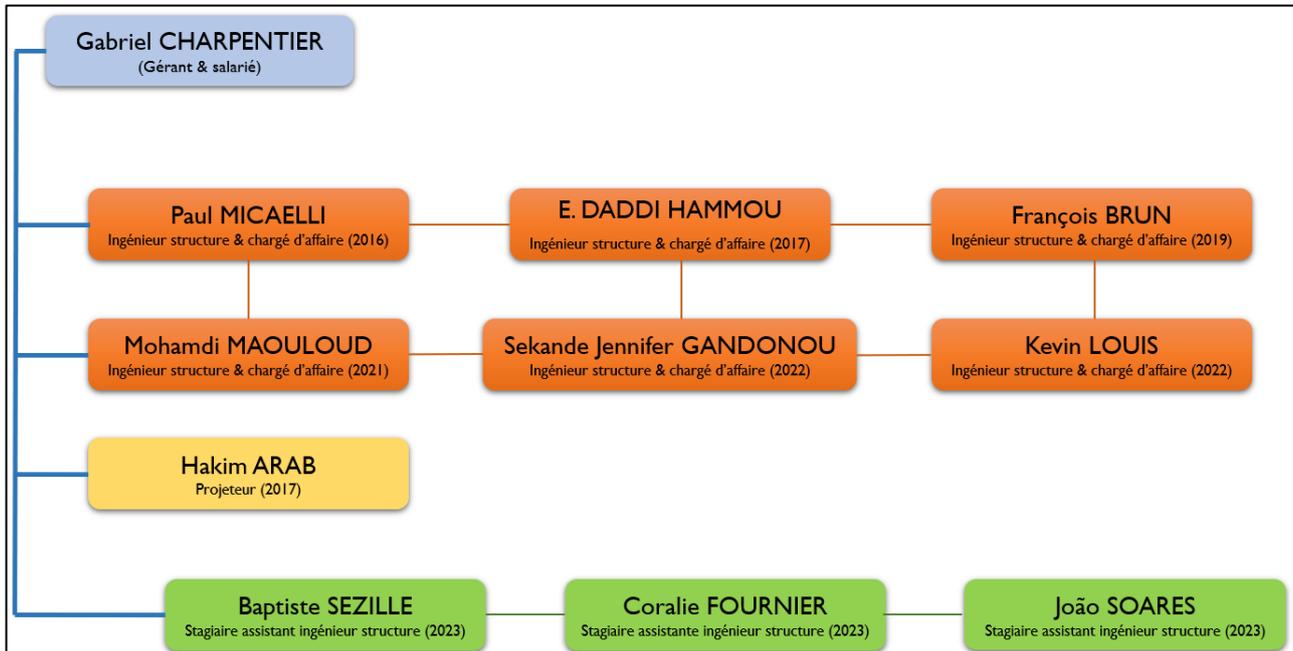


Figure 1 – Organigramme de l'entreprise

Pour soutenir le bon fonctionnement de l'entreprise et contribuer à l'expansion de nouveaux projets, une assistante administrative joue un rôle essentiel en prenant en charge la gestion des tâches administratives et organisationnelles. Son rôle dans l'entreprise comprend également les démarches pour postuler aux dossiers d'appels d'offres de projets de construction, ce qui contribue à la croissance et au succès de Make Ingénierie dans l'obtention de nouveaux contrats.

En tant que bureau d'études dynamique et engagé, Make Ingénierie offre également des opportunités de stage à de jeunes talents en ingénierie. Actuellement, trois stagiaires contribuent activement aux projets de l'entreprise en apportant un regard neuf et de nouvelles idées à l'équipe.

Cette équipe multidisciplinaire rassemble des professionnels compétents et passionnés, dont les compétences complémentaires permettent de répondre de manière efficace et créative aux défis de l'ingénierie structurelle dans une variété de projets de construction et de réhabilitation.

B. Activités de l'entreprise

Make Ingénierie intervient dans les dossiers d'appel d'offres en faisant partie de l'équipe de maîtrise d'œuvre. Cette dernière est une équipe chargée par le maître d'ouvrage de concevoir, diriger et contrôler la réalisation des projets. L'intervention de Make Ingénierie se concentre principalement sur la recherche des meilleures solutions techniques au regard de leur coûts financiers, de leur délai d'exécution et de leur faisabilité en respectant le projet architectural dans lequel elles s'inscrivent.

En ce qui concerne les projets de réhabilitation, l'entreprise est souvent sollicitée pour des tâches telles que les ouvertures de baies, la réalisation des trémies et les surélévations. Ces opérations nécessitent la mise en place de linteaux ou chevêtres en béton ou de profilés métalliques pour renforcer la structure existante. Dans un premier temps, ces interventions doivent répondre aux besoins exposés par le client, tout en accordant une attention primordiale à la conservation des caractéristiques mécaniques et architecturales de l'existant. Afin de préserver la stabilité de la structure existante après les interventions, une analyse détaillée de l'ouvrage existant est menée en se basant sur des hypothèses en l'absence de plans d'exécution de l'époque.

Pour les projets de construction neuve, Make Ingénierie est impliquée dans le dimensionnement de l'intégralité de la structure, depuis les fondations jusqu'à la toiture. Cela demande une expertise approfondie pour garantir la stabilité et la sécurité du bâtiment à toutes les étapes de sa réalisation.

C. Développement durable

L'une des spécialités de Make Ingénierie réside dans la proposition de différents modes structurels adaptés aux besoins spécifiques de chaque projet. Parmi les options envisageables, on peut citer les structures, en ossature légère type poteaux et poutres en bois ou en acier, ou encore en matériaux mixte (bois, béton ou acier) afin de tirer parti des avantages de chaque matériau pour répondre à des exigences spécifiques de portée, de résistance et d'écoconception.

De plus, Make Ingénierie est également en mesure de proposer des matériaux biosourcés, qui sont fabriqués à partir de matières d'origine biologique. Ces matériaux représentent une option intéressante dans l'optique de réduction de l'empreinte carbone du bâtiment et donc de respect des nouvelles réglementation carbone RE2020 sur l'impact carbone de la construction. Parmi les exemples de matériaux biosourcés, on peut citer le béton de chanvre, l'isolation à base de paille, ou encore tout simplement le bois.

Effectivement, le bois est largement reconnu comme étant le matériau biosourcé le plus utilisé en structure, et c'est dans ce domaine que Make Ingénierie se distingue. L'entreprise possède une expertise solide dans la conception et la réalisation de structures en bois pour une variété de projets de construction. Les structures en bois offrent de nombreux avantages, notamment concernant leur durabilité, leur résistance, leur esthétique naturelle et leur faible impact environnemental. Le bois est également un matériau renouvelable, ce qui le rend attrayant du point de vue de la durabilité et de l'écoconception. En intégrant le bois comme matériau de construction, les projets peuvent bénéficier d'une approche éco-

responsable tout en offrant des performances structurelles de haute qualité. Grâce à son expertise en structures bois, Make Ingénierie participe activement à la promotion de solutions durables et respectueuses de l'environnement dans le secteur de la construction.

Le bois est un matériau remarquablement intelligent, étant en réalité l'accumulation d'énergie solaire transformée par la photosynthèse. Cette transformation de l'énergie solaire en bois est essentielle puisqu'elle contribue à l'assimilation du gaz à effet de serre CO₂, jouant ainsi un rôle crucial dans la préservation de l'environnement. La construction en bois repose sur une approche responsable axée sur la valorisation du matériau. A titre d'exemple, elle favorise la préservation et l'entretien des forêts, garantissant ainsi la durabilité de cette méthode de construction. En choisissant le bois comme matériau de construction, nous optons pour une solution respectueuse de l'environnement qui contribue à la lutte contre le changement climatique tout en assurant des structures solides et durables pour les générations futures.

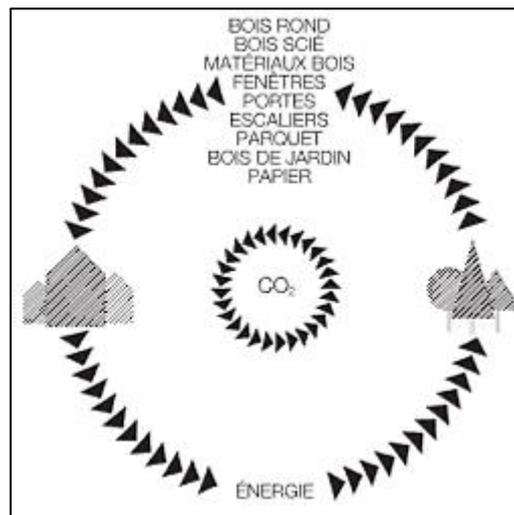


Figure 2 - Cycle global de l'exploitation et de l'utilisation du bois

En collaborant avec Make Ingénierie, le client peut ainsi bénéficier de recommandations éclairées concernant les choix structurels et les matériaux biosourcés, permettant de prendre en compte les aspects environnementaux et durables dans la conception de son projet de construction. Cette approche témoigne de l'engagement de l'entreprise envers des pratiques de construction respectueuses de l'environnement et en phase avec les enjeux actuels de développement durable traduits par la présente réglementation RE2020 et celle avenir RE2022.

Le bureau s'engage fermement en faveur de la sobriété environnementale, en mettant l'accent sur la réduction de l'énergie grise des matériaux utilisés dans ses projets, tout en favorisant l'emploi de matériaux à faible impact environnemental. Cette approche écoresponsable permet de créer des espaces plus confortables, sains et paisibles, sans nécessiter des efforts démesurés.

Ainsi, afin de valoriser les concepteurs impliqués dans l'évolution des pratiques constructives vers une architecture plus respectueuse de l'environnement, le magazine Séquences Bois a créé un classement des agences d'architecture et bureaux d'études engagés dans la construction bas carbone. En reconnaissance des efforts réalisés par Make Ingénierie en 2022, le bureau s'est vu attribuer la troisième place du classement des BET structures les plus impliqués dans ce type de construction. Cette distinction témoigne de leur engagement concret et de leur contribution significative à un avenir plus durable.

Ci-dessous se trouve la liste des bureaux techniques qui figurent sur les cinq premières places du classement :

Les bureaux d'études les plus engagés pour une architecture bas carbone	
Rang	Agence
1	MILAE
2	SCE
3	<i>Make ingénierie</i>
4	ETTEC
5	Ligne BE

Figure 3 - Classement des bureaux d'études structure engagés pour une architecture bas carbone.

Source : Séquence bois n° 136

Aussi, au sein de Make Ingénierie, l'implication dans les domaines des structures et des matériaux écologiques est une réalité bien ancrée. Les employés de l'entreprise ont souvent l'opportunité d'assister à des ateliers et des formations dédiées à ces sujets. Cette participation active à des événements et discussions sur les pratiques écologiques démontre de l'engagement de Make Ingénierie envers une approche plus durable et éco-responsable dans la conception de structures. Les ingénieurs de l'entreprise sont ainsi bien informés et renseignés sur les avancées et les bonnes pratiques en matière de matériaux écologiques et de construction à faible empreinte carbone.

D. Positionnement du stage dans le contexte de l'entreprise

Make ingénierie est un bureau d'études de structures dont les tâches principales consistent à élaborer et mettre au point les directives constructives d'une structure. L'ingénieur structure doit connaître les normes, savoir déterminer la faisabilité d'un projet et décrire précisément le comportement de l'ouvrage dans des perspectives prévisibles, le tout sans perdre de vue les aspects économiques du projet.

L'objectif de ce stage chez Make Ingénierie est de renforcer les connaissances et les pratiques en matière de calcul parasismique au sein de l'entreprise. En pleine croissance, Make Ingénierie est confrontée à des projets de plus grande envergure nécessitant des études de complexité croissante. Ainsi, ce travail de fin d'études offre une opportunité de contribuer au développement des compétences fondamentales de l'entreprise et de consolider son expertise dans le domaine parasismique. Dans le cadre d'un apport mutuel de compétences, j'ai pu apporter une valeur ajoutée à l'entreprise tout en approfondissant mes propres connaissances et compétences dans un domaine stratégique pour le bureau.

L'évaluation de la pertinence de ce stage peut être abordée de manière linéaire et ponctuelle.

Le premier axe concerne le déroulement du stage et les tâches accomplies en tant qu'assistant ingénieur structures. En effet, en plus du projet principal du travail de fin d'études, plusieurs missions m'ont été confiées depuis le début du stage. Celles-ci ont été importantes pour approfondir mon socle de compétences et me permettre d'étudier des projets de complexité croissante que j'ai été amené à traiter ultérieurement. Les premiers mois ont été dédiés à l'intégration et à l'adaptation à la culture de l'entreprise, en traitant des projets plus simples tels que les réhabilitations légères. En tant que le responsable de ces projets, j'ai dû prendre du recul pour relier les connaissances acquises à l'école aux situations réelles de projet. Le suivi attentif des ingénieurs du bureau a été primordial, car il m'a permis d'effectuer ces études en toute sérénité, sachant que quelqu'un était toujours disposé à vérifier mon travail.

Cette prise de responsabilité croissante m'a permis de jouer un rôle de plus en plus important au sein du bureau. Comme preuve de mon implication dans divers projets, on m'a confié des études de conception de constructions neuves, telles que des parkings, bureaux et logements, ainsi que la réalisation d'études en

phase EXE de projets de réhabilitation. Cette évolution est un indicateur significatif de mon apprentissage dans ce stage.

Le second aspect déterminant pour valider la pertinence du stage relève de l'impact de l'étude principale du TFE, ainsi que des démarches et outils développés tout au long de sa réalisation. L'objectif de cette étude est de confronter la modélisation d'une structure sur deux logiciels différents, ce qui permettra de guider Make Ingénierie dans le choix du meilleur outil de calcul et d'établir une méthodologie plus précise dans le cadre de projets parasismiques.

Dans l'ensemble, je considère ce stage comme une expérience très enrichissante, non seulement pour mon propre développement professionnel, mais aussi pour l'apport concret que j'ai pu offrir à l'entreprise Make Ingénierie, en contribuant à son savoir-faire dans le domaine parasismique et en participant activement à des projets que j'ai trouvé intéressants.

II. Conception et dimensionnement des structures – Modélisation sous Arche Ossature et Robot

A. Projet MLC : conception de deux bâtiments R+2 avec un niveau de sous-sol à Montigny-les-Cormeilles

1. Présentation du projet

La mission confiée à Make Ingénierie par l'agence d'architecte Patrimoine Architecture Design porte sur la conception et le dimensionnement de la structure de deux bâtiments reliés par un parking en sous-sol, de la phase AVP jusqu'à la phase DCE.

L'ouvrage est situé dans le département du Val d'Oise, qui est classé en zone de sismicité I, marquée par un faible aléa sismique. Les deux bâtiments sont destinés à recevoir des logements (catégorie d'importance II), par conséquent l'analyse sismique n'est pas nécessaire dans ce projet.

Je me suis occupé de la conception, du dimensionnement, de la production des plans et de la rédaction des pièces écrites (CCTP et DPGF) pendant ces phases.



Figure 4 - Maquette architecturale renderisée (en haut) et Maquette structure (en bas)

2. *Processus de conception*

Avant d'entamer la phase de modélisation, l'ingénieur doit élaborer un document appelé minute structure qui consiste à annoter un plan sur la base des plans d'architectes. Cette étape vise principalement à vérifier et garantir la faisabilité des volumes conçus par les architectes du point de vue structurel. De plus, la minute structure permet de communiquer aux autres acteurs du projet la position des éléments structuraux et leurs dimensions.

Au cours du projet, de nombreuses réunions ont eu lieu : les premières avec la maîtrise d'œuvre se focalisaient sur la promotion de l'interaction entre les différentes parties prenantes du projet, permettant ainsi à chaque intervenant de présenter son rôle dans la conception du bâtiment. C'est le moment dans lequel l'échange entre les professionnels est valorisé dans le but de faire évoluer le projet de façon conjointe. Les ingénieurs exposent leurs principaux éléments de conception, et les éventuels conflits sont identifiés dès le départ, afin que des solutions puissent être trouvées rapidement.

J'ai pu assister à l'ensemble de réunions synthèse depuis le début du projet, ce qui m'a donné l'opportunité de contribuer à plusieurs décisions dans la conception du projet. Cette expérience m'a permis d'avoir une meilleure compréhension globale sur le processus initial de conception d'un bâtiment. Au début, le champ d'action de chaque professionnel – de ses besoins, ses attentes, et leur impact sur la structure – étaient plutôt flous pour moi. Cependant, grâce aux réunions hebdomadaires, ces informations se sont naturellement ancrées dans mes connaissances.

C'est en se basant sur notamment sur ces règles forfaitaires, et en réalisant des dimensionnements, que dans la minute structure, on met en évidence : le repérage et le sens de portées des dalles ; l'emplacement des poteaux, des poutres, des murs porteurs et non-porteurs, ainsi que le principe structurel de certains éléments spécifiques tels que les balcons et les loggias. Ci-dessous un exemple de minutes pour le pour le dimensionnement du R+1 du projet.

Par exemple, j'ai appris que c'est pour des besoins acoustiques que les voiles en béton armé doivent avoir une épaisseur minimum de 20 cm entre une circulation verticale (cage d'ascenseur ou d'escalier) et un logement. De même, pour des raisons acoustiques, entre un étage de commerce et un étage de parking, les dalles BA doivent avoir une épaisseur minimum de 23 cm.

C'est en se basant sur notamment sur ces règles forfaitaires, et en réalisant des dimensionnements, que dans la minute structure, on met en évidence : le repérage et le sens de portées des dalles ; l'emplacement des poteaux, des poutres, des murs porteurs et non-porteurs, ainsi que le principe structurel de certains éléments spécifiques tels que les balcons et les loggias.

Ci-dessous un exemple de minutes pour le dimensionnement du R+1 du projet.

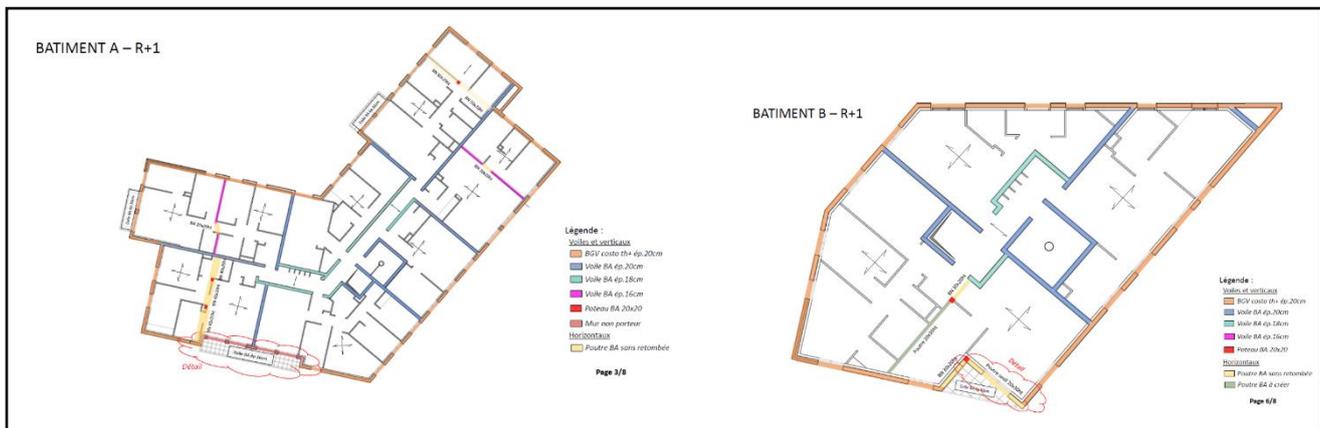


Figure 5 – Minute de dimensionnement du projet MLC : Bâtiment A (en haut) et Bâtiment B (en bas)

Les minutes des autres étages figurent dans l'annexe A1.

Si les porteurs verticaux sont discontinus en élévation, il conviendra de proposer sur la minute la mise en place d'un mécanisme de reprise permettant de transférer les charges vers les fondations de manière efficace, tout en préservant le bon fonctionnement de la structure. Cette interruption dans la continuité des éléments porteurs est susceptible de se produire plus fréquemment au niveau des parkings en sous-sol. La trame structurelle des étages d'habitation perd alors de sa priorité pour respecter les emplacements de stationnement, qui imposent des contraintes spatiales significatives dans cette situation.

La minute de dimensionnement garde un caractère évolutif durant la phase d'avant-projet, où elle constitue le principal rendu de l'ingénieur structure. Dans les premières versions d'une minute, on va s'intéresser prioritairement au positionnement des porteurs. Leurs dimensions sont définies de manière forfaitaire en se basant sur la pratique professionnelle.

Ensuite, dans le but d'apporter une solution plus concise, on va élaborer un modèle structurel du bâtiment à l'aide d'un outil de calcul et à ce stade on peut établir des dimensions plus réalistes et plus justes.

Au fur et à mesure de la planification des réunions, le projet prend une forme plus tangible, reflétant ce qu'il sera effectivement lors de sa construction.

On ne doit pas sous-estimer la quantité de travail de synthèse nécessaire pour répondre aux besoins de toutes les parties impliquées car on rencontre souvent des conflits classiques, comme celui entre le BET structure et le BET fluides lorsqu'il s'agit du passage de conduits.

Voici le modèle de calcul du bâtiment élaboré sur le logiciel de calcul Arche Ossature :

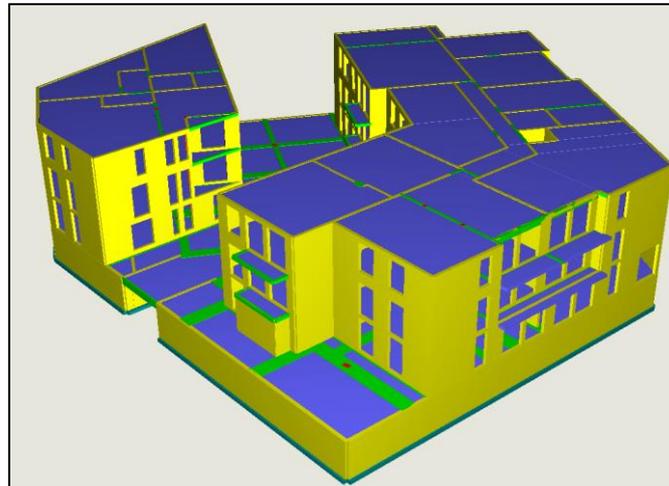


Figure 6 - Visualisation 3D de la structure modélisée sur Arche Ossature

Dans ce projet, on a constaté que le BET fluide avait prévu un nombre excessif de percements dans la hauteur des poutres de reprise du parking, localisé près de leurs points d'appui. Cela n'est pas acceptable d'un point de vue structurel. De ce fait, on a utilisé Arche Ossature soit pour optimiser les dimensions de ces poutres, qui étaient souvent surdimensionnées dans les premières minutes de dimensionnement ; soit pour examiner précisément les endroits où un percement aurait moins d'impact sur la structure.

Ci-dessous un plan de repérage des conflits de passage de conduits au niveau des poutres au sous-sol. Les conduits en rose sont ceux proposés initialement par le BET fluides et ceux en vert correspondent à l'adaptation que j'ai proposée. Une image plus lisible se trouve dans l'annexe A2.

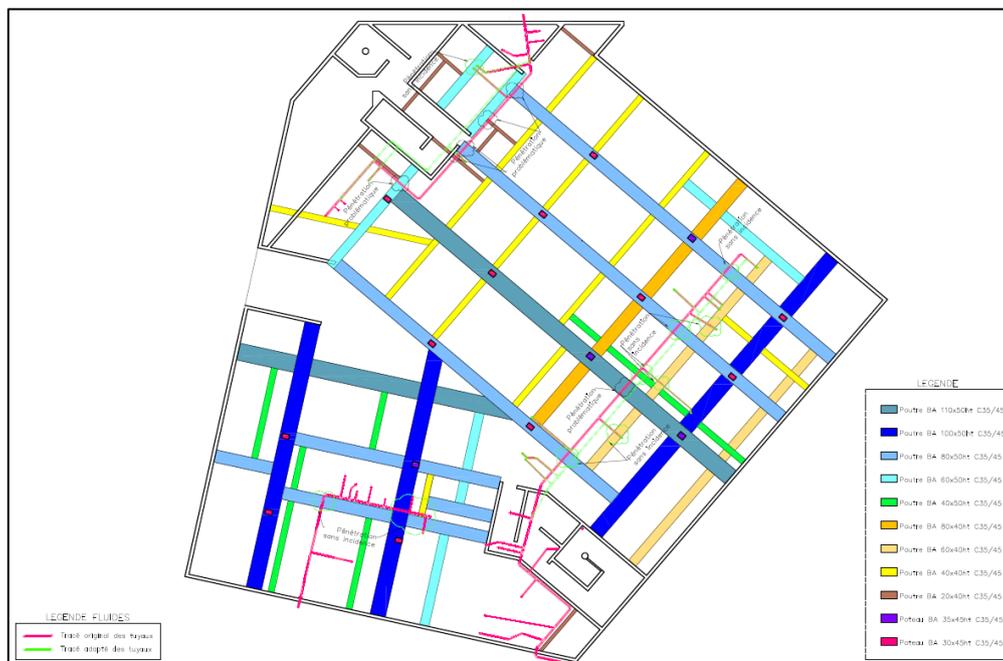


Figure 7 - Conflits de passage de conduit au sous-sol

La vérification de chaque percement peut être réalisée à la main de façon simplifiée et ensuite, à l'aide du logiciel, le calcul peut être raffiné et concrètement validé avec toutes les combinaisons de charges agissantes sur l'élément.

Ci-dessous une capture d'écran du module de ferrailage de poutres du logiciel :

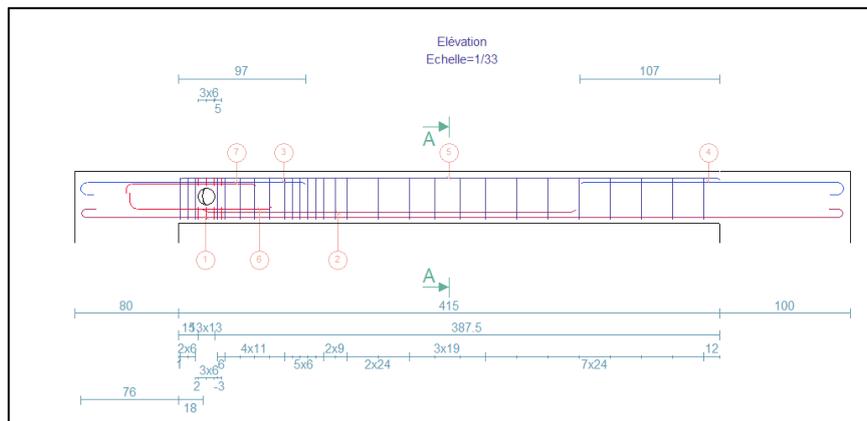


Figure 8 - Ferrailage de la poutre percée près de l'appui - Arche Ossature

Ce projet m'a apporté une richesse d'expérience non seulement en termes d'ingénierie, mais aussi par la nécessité de prendre du recul pour le mener à bien. Il a été marqué par une collaboration entre divers acteurs du domaine de la construction.

L'opportunité d'échanger avec ces professionnels était d'une grande importance pour moi. En tant qu'expatrié la prise de parole en public exige une forte affirmation de soi. Ce projet m'a offert l'occasion de porter ma voix dans mes interactions et de comprendre l'importance de l'écoute dans le contexte professionnel.

B. Projet RDP : surélévation d'un immeuble au 50 rue du Nord à Paris

3. Présentation du projet

Dans le cadre de ce projet, Make Ingénierie avait été mandatée pour la réalisation d'une surélévation d'un bâtiment par l'ajout d'un étage au-dessus de la structure existante. À l'état actuel, le bâtiment comprend un commerce au rez-de-chaussée et quatre étages résidentiels. Le projet implique la démolition de la toiture existante afin de pouvoir créer un nouvel étage de logement en attique.

Les missions principales auxquelles j'ai pu contribuer dans ce projet comprenaient la réalisation d'une descente de charges comparative, le prédimensionnement des éléments structuraux pour la surélévation, ainsi que le dimensionnement de renforcements pour la phase de DCE. En ce qui concerne la phase EXE, j'ai été chargé de réaliser le dimensionnement de tous les éléments structuraux et de développer des plans d'exécution. Pendant cette étape, la tâche la plus chronophage a été l'élaboration d'un guide d'assemblage pour les éléments en bois de la charpente, ce qui nécessite un niveau de détail substantiel.

Ce projet a été modélisé en utilisant trois logiciels de calcul : Arche Ossature, Robot Structural Analysis et Master EC5. Le premier a été employé pour réaliser une descente de charges comparative durant la phase de DCE, le deuxième pour dimensionner des éléments en bois de la charpente, et le troisième pour calculer des assemblages bois. En parallèle, le logiciel Revit a également été intégré dans le projet dans le but de fournir les plans détaillés des éléments en 2D ainsi qu'une maquette 3D, qui a permis d'exploiter la spatialité du projet.

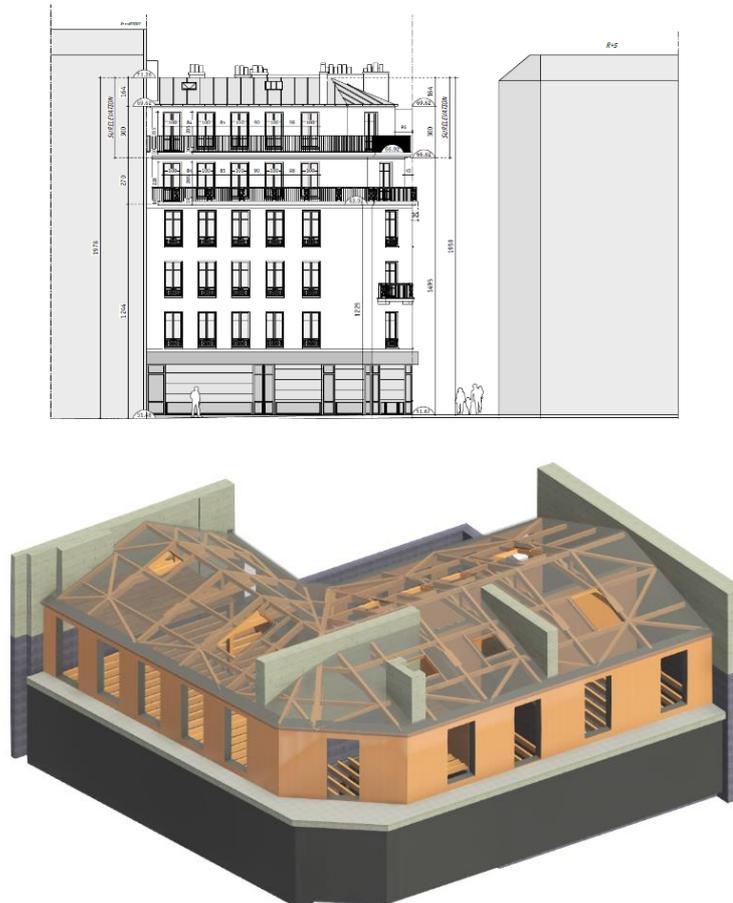


Figure 9 – Elévation architecturale du projet RDN (en haut) et modèle Revit de la structure de surélévation (en bas)

D'un point de vue géopolitique, la surélévation des bâtiments s'impose comme l'une des solutions les plus couramment adoptées dans le processus de réurbanisation des villes actuellement. Alors qu'au cours des années 1980, le développement urbain se caractérisait par une expansion en surface, avec la création de zones d'habitat pavillonnaire, cette approche est désormais perçue comme trop favorable à l'industrie automobile, car elle entraîne une augmentation des distances et des temps de déplacement. C'est pourquoi, ces dernières années, les surélévations constituent une réponse pour accueillir les nouveaux habitants des villes en densifiant le tissu bâti, tout en évitant les inconvénients liés aux extensions périphériques.

Pour l'ingénieur en structures, une mission de conseil en surélévation constitue un ensemble de tâches intermédiaires avant concrétisation des travaux. Contrairement aux missions de construction neuve, surélever un bâtiment nécessite une étude préalable de l'existant. En examinant les plans d'époque et en effectuant des visites sur site, l'ingénieur doit avoir une compréhension claire du fonctionnement de la structure existante avant d'entreprendre toute intervention. Il arrive fréquemment que les plans d'époque soient absents ou ne reflètent plus l'état actuel de la structure en raison des modifications survenues au fil des années. Dans de tels cas, l'ingénieur peut s'appuyer sur les connaissances acquises grâce à d'autres projets pour formuler des hypothèses qui justifient la tenue de la structure. Bien évidemment ces hypothèses doivent être vérifiées par des sondages réalisés avant le début des travaux.

L'une des tâches les plus importantes dans un projet de surélévation est la réalisation d'une descente de charges comparative. Cette étude permet de justifier la faisabilité de la surélévation où trois cas de figure peuvent se produire :

- Surélévation justifiée sans intervention au sous-sol : Dans ce cas, le poids supplémentaire peut être supporté sans compromettre les fondations existantes, soit parce que l'augmentation de la charge est minime par rapport au poids total de la structure, soit grâce à la présence de fondations surdimensionnées dans le projet initial.
- Surélévation justifiée avec intervention au sous-sol : Lorsque le poids ajouté représente une charge significative par rapport aux charges existantes, des reprises au niveau des fondations peuvent permettre de maintenir la capacité portante du sol. Dans cette situation, un géotechnicien est sollicité pour garantir la stabilité des fondations en respectant les critères en termes d'ELS et d'ELU.
- Surélévation non-justifiée : Si le projet de surélévation entraîne une charge excessive menaçant l'intégrité de la structure, il est impératif de revoir le projet. Dans ce cas, l'ingénieur doit conseiller l'architecte sur le choix des matériaux, qui peuvent influencer la faisabilité du projet, ainsi que sur les bonnes pratiques à suivre pour mener à bien un projet réussi.

4. Justification de la surélévation en bois

Pour ce projet, le choix de réaliser la surélévation en bois était déterminant pour garantir sa faisabilité. Le bois s'impose comme un matériau adapté aux surélévations car il combine une excellente capacité statique, rapidité dans la mise en œuvre et de bonnes capacités thermiques.

Lorsqu'on compare les poids volumiques entre le bois et le béton, on constate que le bois est cinq fois moins lourd que son concurrentiel.

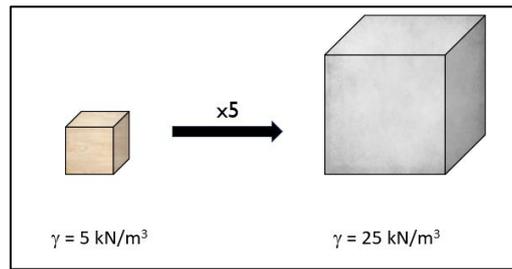


Figure 10 - Comparaison des poids volumiques du bois et du béton

Ce rapport peut être encore plus significatif pour les éléments de type paroi. En effet, les parois en bois présentent environ 50 % de vide, ce qui peut augmenter ce rapport jusqu'à dix fois la légèreté d'un voile en béton. Ainsi, l'utilisation du bois dans un projet de surélévation permet une faible incidence sur la masse totale de la structure, tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques.

Pour mettre en évidence l'avantage du bois par rapport au béton en termes de masse du bâtiment, prenons un exemple hypothétique : un bâtiment de 4 étages devant être surélevé de 2 étages.

La première option consiste à surélever les deux étages en utilisant des éléments en béton. Dans ce cas, on remarque que les charges exercées sur les fondations doivent reprendre 50 % d'effort en plus de ce qui avait été prévu lors de la construction initiale. De plus, les éléments porteurs du dernier étage doivent résister à des charges considérablement plus élevées, car à l'origine chaque poteau supportait $0,25P$, et après la surélévation, cette valeur passe à $0,75P$. Il est très probable que des renforts soient nécessaires pour ces éléments, ce qui, bien sûr, augmente le coût global de la surélévation.

Aussi, pour le bois on note que l'ajout moyen de poids par étage est nettement moins important que la dernière solution. L'impact aux fondations est minimum et les porteurs du dernier étage doivent être en mesure de reprendre les nouvelles charges induites sans la nécessité d'un renfort.

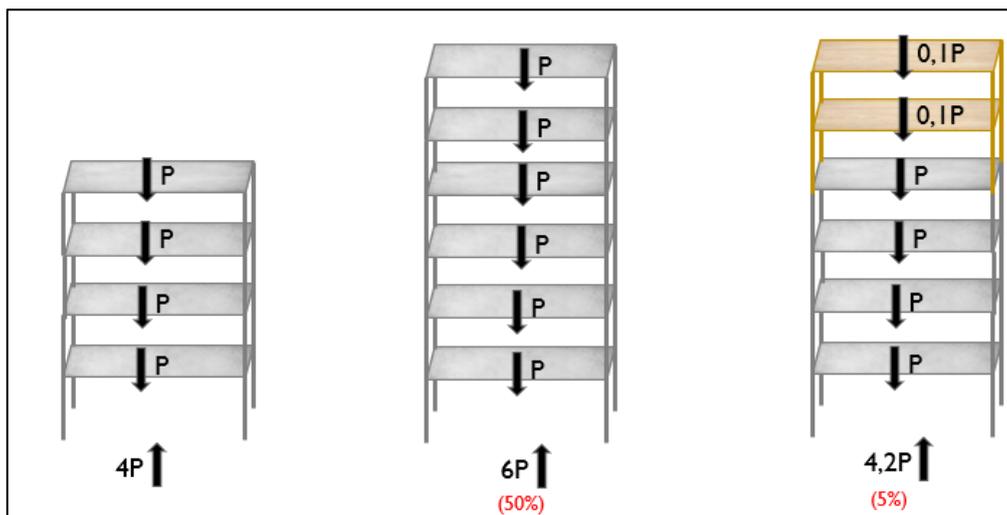


Figure 11 - Différences entre une surélévation en bois et béton - Charges gravitaires

La surélévation en bois se montre encore plus performante à l'égard d'une étude parasismique.

Pour illustrer ce propos, on reprend la même structure et par simplification on considère que les forces de latérales sont équivalentes aux masses de chaque étage.

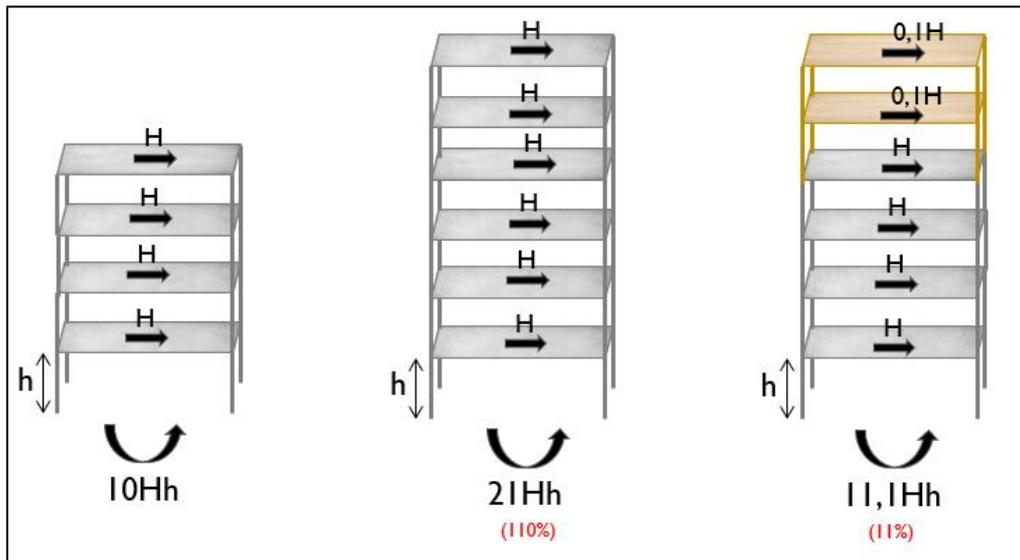


Figure 12 - Différences entre une surélévation en bois et béton - Charges sismiques

Il est à noter qu'en ce qui concerne le moment renversant, la solution en béton s'avère être trop contraignante pour les fondations. Cela pourrait être l'origine d'un décollement des fondations, et si la limite imposée par l'Eurocode est dépassée, cela nécessiterait l'intervention d'un géotechnicien. D'autre part, la solution en bois entraîne également une légère augmentation du moment, mais cette augmentation peut être considérée comme marginale par rapport à l'ensemble des charges agissantes.

Il convient de souligner que cet exemple repose sur un calcul simplifié, mais il illustre néanmoins que la réalisation d'une surélévation nécessite d'une analyse précise du transfert des charges verticales et horizontales. Des renforcements ponctuels peuvent être nécessaires en fonction des solutions envisagées.

5. Conception et modélisation

Le premier modèle a été conçu en utilisant le logiciel Arche Ossature, dans le but spécifique de comparer les charges exercées sur les fondations avant et après la surélévation. Bien que la distribution des charges puisse être effectuée manuellement, l'outil Arche présente une facilité de modélisation, une efficacité et une rapidité dans l'interprétation des résultats qui en font l'outil optimal pour ce type de tâche.

Une fois que la faisabilité de la surélévation est confirmée, il devient nécessaire d'effectuer un prédimensionnement des éléments verticaux et horizontaux porteurs. Ces éléments jouent le rôle de support pour la charpente et de système de contreventement. Pour choisir les sections appropriées des éléments en bois, on se réfère aux débits commerciaux tout en observant les bonnes pratiques du métier. En effet, un prédimensionnement intelligent simplifie les étapes ultérieures en éliminant une source potentielle d'erreurs.

Ensuite, on passe à la modélisation sur le logiciel Robot Structural Analysis. Dans cette partie du travail, on s'intéresse à reproduire sur le logiciel ce qu'on avait conçu dans l'étape de prédimensionnement. On récupère les dimensions en plan des porteurs et leurs emplacements et on les applique les charges réglementaires.

Dans notre projet elles sont les suivantes,

- Charge d'exploitation (Habitation) : 1,5 kN/m² ;
- Charge d'exploitation (Toiture) : 0,8 kN/m² ;
- Charge climatique (Neige) : 0,45 kN/m² ;
- Charge climatique (Vent) : 0,65 kN/m² ;

Le poids propre est calculé par le logiciel en utilisant les poids propres des matériaux présents dans la bibliothèque intégré sur Robot. Ci-dessous le modèle des barres utilisé pour le dimensionnement :

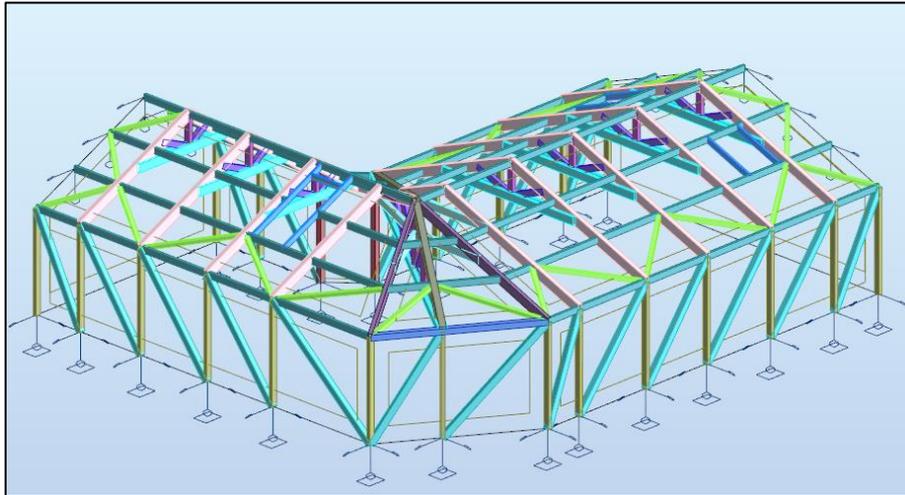


Figure 13 - Modèle de la structure de surélévation sur Robot Structural Analysis

Avant d'exploiter les résultats du modèle, il est nécessaire d'effectuer plusieurs vérifications qui concernent les données d'entrée, le comportement du modèle sous l'effet des charges qui lui sont appliquées, ainsi que la qualité des sorties fournies par le logiciel. Dans un bureau d'études en structures, les projets peuvent être gérés par différentes personnes à différentes phases du projet, ce qui souligne l'importance de ces étapes, même si elles peuvent sembler répétitives.

Les vérifications les plus importantes pour repérer d'éventuelles erreurs dans le modèle se concentrent principalement sur les déformations et les diagrammes des efforts internes. L'aspect général des déformations donne une première impression du comportement de la structure en réaction aux charges appliquées, tandis que les diagrammes permettent de confirmer le comportement adéquat des relâchements et conditions d'appui des barres.

On aborde ensuite la production du guide d'assemblage, ce qui marque la dernière des missions confiées à Make Ingénierie dans ce projet. Ce guide a pour objectif de créer un ensemble de plans et de détails concernant les organes d'assemblage des pièces en bois qui constituent la charpente. Même si cette étape est réalisée en fin d'étude, le calcul des assemblages est souvent considéré comme une démonstration de l'expertise technique de l'ingénieur, car il intègre plusieurs paramètres méticuleux d'un point de vue théorique tout en prenant en compte la faisabilité pratique du concept.

Dans ce projet, on a préconisé la réalisation d'assemblages mécaniques par des organes métalliques. Pour ce faire, on s'est appuyé sur des ouvrages consacrés au calcul des assemblages pour les structures en bois, ainsi que sur un logiciel édité par Graitec appelé Master EC 5.

L'image suivant montre l'interface du logiciel :

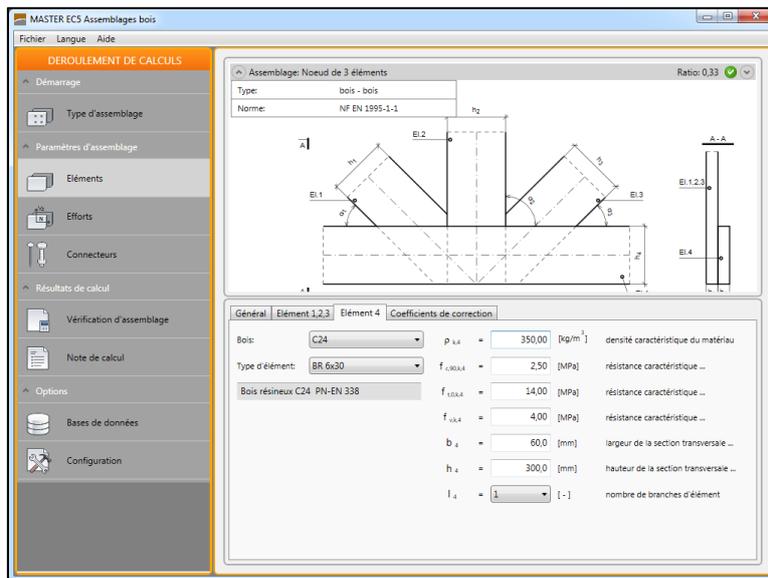


Figure 14 – Assemblage entre l'entrait, le poinçon et les diagonales d'une ferme sur Logiciel Master EC 5

Avant de lancer le calcul de l'assemblage, il est nécessaire de récupérer les charges calculées par Robot Structural Analysis, puis les renseigner sur Master EC 5 pour pouvoir finalement exploiter les résultats. Lors de cette opération de transmission d'informations, il est important de prêter attention aux différentes unités et conventions utilisées par chaque logiciel, car il est bien connu que cette opération a été la source de nombreux problèmes dans le domaine de la construction.

Une fois que le calcul de l'assemblage est fini, la prochaine étape consiste à dessiner l'ensemble des composants de l'assemblage, y compris les éléments en bois à assembler, les organes et plaques métalliques. A ce stade il est nécessaire de vérifier que les dispositions constructives ont été respectées par le logiciel et de veiller à la clarté des plans, afin d'éviter toute confusion sur le chantier. Ci-dessous un exemple d'un détail d'assemblage du projet :

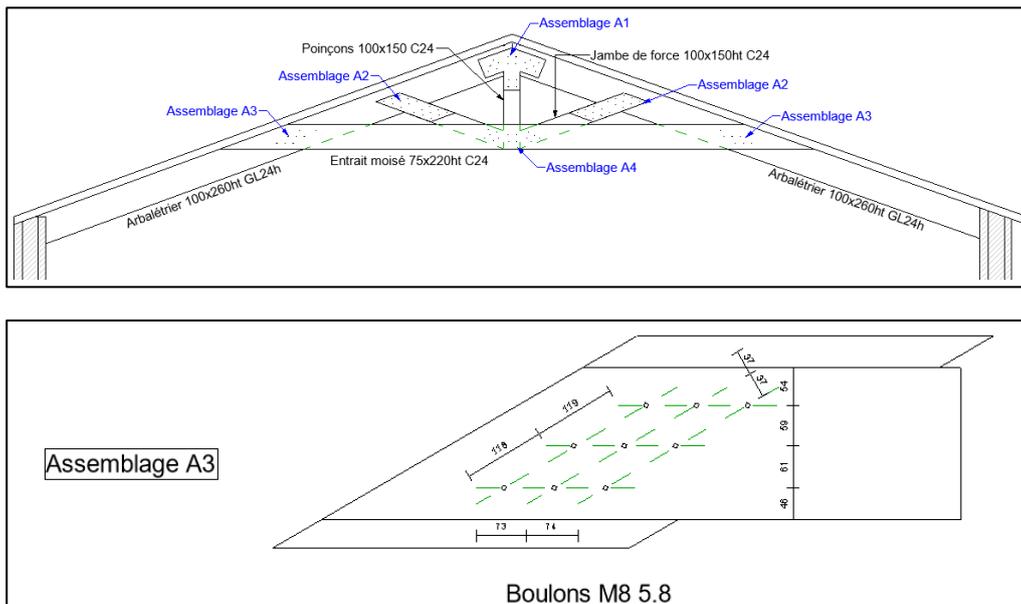


Figure 15 - Plan de repérage des assemblages pour une ferme (en haut) et détail de l'assemblage A3 (en bas)

Je classifie ce projet comme formateur, car il m'a ouvert la voie vers diverses missions relevant du domaine de l'ingénierie des structures. J'ai commencé à développer ma capacité de raisonnement en tant qu'ingénieur en déterminant les sections des éléments avec un choix fondé sur un comportement global adéquat pour la structure. Par la suite, la manipulation de différents logiciels a joué un rôle important dans ma formation, car elle m'a permis de les utiliser régulièrement sur d'autres projets et de mieux connaître leurs avantages et inconvénients.

En outre, j'ai eu l'opportunité de me rendre sur site pour interagir avec les professionnels responsables de la mise en place des éléments. Cette expérience sur le terrain a été une occasion précieuse d'apprendre en dehors de l'environnement du bureau.

Un exemple illustrant l'une de ces interactions concerne la surélévation en attique. Pour prendre en compte les charges linéaires des murs en retrait par rapport à la façade, j'avais préconisé d'utiliser des profilés HEB, qui répondaient parfaitement aux exigences structurelles. Cependant, l'équipe de chantier les a trouvés trop lourds et difficilement manipulables. J'ai donc dû trouver une solution plus adaptée aux contraintes du chantier, des contraintes que je n'aurais pu pleinement appréhender qu'en étant présent sur place.

La possibilité de voir un projet qui n'était qu'une idée sur le papier au départ se transformer en une réalité tangible est une expérience incroyablement gratifiante.

C. Projet divers

1. RDP – Conception d'un bâtiment de bureaux à rue de Paris (APS)

- Client : Aequo construction ;
- Mission : Conception d'un bâtiment en BA et une variante en bois ;
- Outils : Arche Ossature et Robot.

2. DQE – Conception d'un parking à Brest (Concours)

- Client : Claas architectes ;
- Mission : Conception d'un parking en BA dans une zone sismique ;
- Outils : Calculs manuels.

3. HTC – Ouverture de mur porteur à l'avenue Hoche à Paris (EXE)

- Client : Boreal bâtiment ;
- Mission : Conseil structure d'exécution d'une ouverture de mur et dépose de conduite de cheminé dans un bâtiment haussmannien ;
- Outils : Robot.

4. PDL – Surélévation à rue Philibert Delorme à Paris (EXE)

- Client : Particulier ;
- Mission : Exécution d'une surélévation en bois ;
- Outils : Robot.

5. LIL – Ouverture de mur porteur aux Lilas (EXE)

- Client : Particulier ;
- Mission : Conseil structure d'exécution d'une ouverture de mur dans un IGH ;
- Outils : Robot.

III. Analyse sismique

A. Génie Parasismique

Un séisme se manifeste lorsque des mouvements se produisent le long des plaques tectoniques, en particulier le long des failles aux frontières de ces plaques. Lorsque ces failles subissent des frottements significatifs, elles accumulent de l'énergie, bloquant ainsi leur mouvement. Cependant, cette accumulation d'énergie a une limite, et une fois atteinte, la faille se rompt brusquement. Cette rupture libère l'énergie accumulée sous forme de mouvements brusques et de vibrations du sol. On peut définir un séisme comme la secousse résultant de ce processus d'accumulation d'énergie.

Lorsqu'on cherche à évaluer l'importance d'un séisme, deux paramètres sont pris en compte : sa magnitude et son intensité. La magnitude, une valeur sans unité, représente l'énergie libérée par le séisme sous forme d'ondes sismiques. Elle est mesurée de manière objective à l'aide d'un sismographe et ne dépend pas du lieu d'observation. En revanche, l'intensité mesure les effets et les dommages provoqués par le séisme en un endroit précis. Contrairement à la magnitude, l'intensité n'est pas évaluée à l'aide d'instruments, mais repose plutôt sur l'observation des dégâts causés par le séisme.

Bien que des activités sismiques puissent être observées partout sur la planète, les effets des séismes ne sont pas ressentis de la même manière en différents endroits. Dans le domaine du génie parasismique, le concept de risque sismique est utilisé pour classer les régions les plus susceptibles de subir des dommages et qui nécessitent donc des mesures parasismiques rigoureuses. Ce risque sismique est caractérisé par deux éléments : l'aléa sismique et la vulnérabilité. L'aléa sismique concerne la probabilité qu'un séisme se produise. Par exemple, la proximité d'un lieu par rapport à une plaque tectonique indique un aléa plus élevé que dans un endroit situé au milieu de la plaque. La vulnérabilité sert à exprimer la gravité des effets et des conséquences lorsqu'un séisme survient. La figure suivante exprime graphiquement le concept du risque sismique.

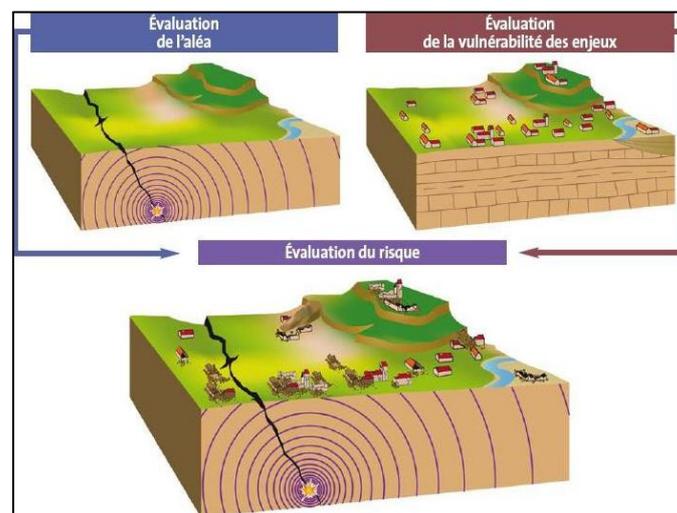


Figure 16 - Risque sismique = Aléa \times Vulnérabilité

Les stratégies envisageables pour réduire le risque sismique incluent :

- Évaluer l'aléa en comprenant l'activité sismique de la région ;
- Hiérarchiser les enjeux. L'enjeu humain se traduit par la préservation des vies humaines, il doit être toujours prédominant dans la notion de l'ingénierie parasismique. L'enjeu économique concerne les dégâts matériels subis par les édifices, les usines, les infrastructures et les réseaux ;

- Réduire la vulnérabilité en mettant en place des réglementations parasismiques adaptées aux caractéristiques locales.

Actuellement, en France, le document réglementaire en vigueur est l'Eurocode 8, résultat d'un travail évolutif commencé en 1955 avec les recommandations parasismiques « AS55 » élaborées à la suite du séisme d'Orléansville. Grâce à une série d'avancées, motivées par la récurrence meurtrière de ces événements, une meilleure compréhension du comportement sismique peut être assurée à nos jours.

L'un des concepts fondamentaux de l'Eurocode 8 est la création d'un zonage sismique, qui permet de diviser le territoire français en plusieurs zones présentant une sismicité équivalente. La carte en vigueur depuis 2011 est affichée ci-dessous :

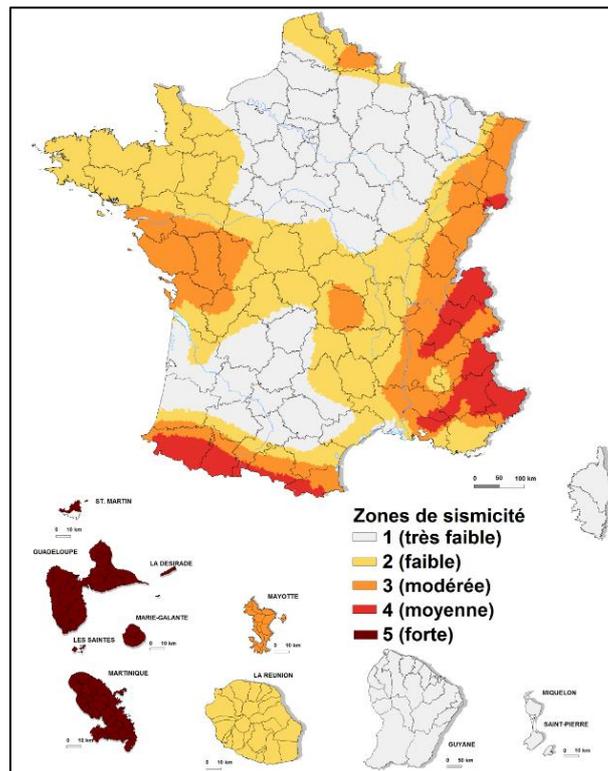


Figure 17 - Zonage sismique en vigueur depuis 2011

Ensuite on va s'intéresser aux concepts architecturaux qui jouent un rôle important dans la protection des bâtiments contre les effets des séismes. Le comportement d'un bâtiment sous séisme est pratiquement déterminé en amont de l'application des règles parasismiques parce que c'est au moment de l'esquisse qu'on fixe sa géométrie et son type de structure.

B. Conception parasismique

L'étape initiale de la conception parasismique démarre avec le projet architectural. Les architectes doivent prendre conscience de l'impact crucial de leurs conceptions sur la réaction d'une structure face aux séismes. Certaines configurations peuvent fragiliser la capacité de résistance aux tremblements de terre, engendrant potentiellement des dommages significatifs aux bâtiments. De plus, les agencements volumétriques peuvent intensifier les forces sismiques en entraînant une résonance entre les fréquences des secousses et celles du bâtiment.

Le comportement global d'une structure induite par les contraintes sismiques est largement conditionné par sa configuration en plan. Les formes compactes et régulières sont particulièrement privilégiées par les ingénieurs en structures, car elles présentent plusieurs axes de symétrie, alignant ainsi les centres de masse et de cisaillement. Cet alignement prévient les problèmes de torsion susceptibles d'émerger au sein de la structure.

En revanche, lorsque les centres de masse et de cisaillement sont excentrés, cela induit des forces de torsion qui amplifient les sollicitations sur les éléments de construction. Par conséquent, il est primordial de prendre en compte ces éléments lors de la conception d'un bâtiment pour éviter des contraintes excessives sur les éléments porteurs.

Il convient également de surveiller les parties en saillie ou en retrait du bâtiment, même si elles semblent symétriques. En raison des différences de rigidité, elles peuvent entraîner des oscillations différentielles, provoquant des concentrations de contraintes aux coins de la structure.

C. Procédures d'une analyse sismique

Une analyse sismique suit une séquence d'étapes avant que les résultats sismiques issus d'un logiciel puissent être exploités.

Le processus commence par une analyse statique. À ce stade, la structure du bâtiment est modélisée sans prendre en compte les forces générées par un séisme. Les éléments sont placés dans leurs positions sur le plan, et leurs dimensions sont calculées pour résister les charges permanentes, d'exploitation et climatiques.

Ensuite, on s'intéresse à l'analyse modale, au cours de laquelle les modes propres de la structure sont identifiés. Les modes de vibration d'une structure représentent les différentes configurations qu'elle adopte lorsque soumise à une source de vibrations externe qui la fait résonner. Ces modes sont généralement caractérisés par leurs formes à différentes périodes propres, et ils sont classés en modes de translation, selon les deux directions principales du bâtiment, ainsi qu'en mode de torsion.

La recherche des modes de vibration est liée à la manière dont la structure est modélisée. Dans le cas de structures complexes, de nombreux modes peuvent être calculés, mais il est important de déterminer ceux qui sont véritablement significatifs pour l'analyse sismique. Pour ce faire, l'importance de chaque mode est évaluée en fonction de la quantité de masse qu'il mobilise lors de la vibration. Par conséquent, le premier mode est celui qui, lorsqu'il est excité à une fréquence donnée, met en mouvement la plus grande quantité de masse dans la structure. Les modes suivants présenteront d'autres formes de vibrations pour d'autres fréquences qui sont plus élevées que les antérieures.

On note alors que la souplesse des modes est décroissante, autrement dit, exciter les modes supérieures d'une structure demande une quantité d'énergie plus importante ce qui fait qu'on perd l'intérêt de les prendre en compte dans l'analyse du comportement global du bâtiment.

Dans l'analyse globale, il est également essentiel de faire attention à la pertinence des modes de vibration. Cela implique spécifiquement d'évaluer si les premiers modes sont de nature locale ou globale. Lorsque l'on recherche les premiers modes, il peut arriver qu'ils concernent la mise en vibration d'une partie localisée du bâtiment. Cela peut être non pertinent d'un point de vue global de la structure. Par exemple, un plancher avec une portée considérable peut présenter une flexibilité significative, ce qui pourrait être interprété par un logiciel comme le premier mode de vibration. Cependant, du point de vue du dimensionnement sismique du bâtiment, ce mode peut ne pas être déterminant.

La figure suivante explicite la différence entre les modes globaux et le mode local :

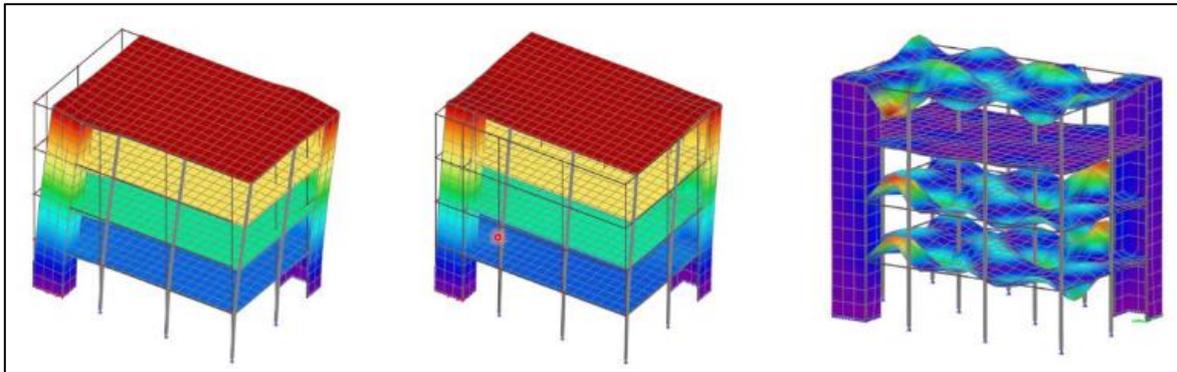


Figure 18 - Modes de vibration d'un bâtiment : Global de translation (à gauche et au centre) et local de flexion des planchers (à droite)

L'ingénieur en structures doit être compétent pour interpréter les résultats et les utiliser judicieusement afin de mener à bien son analyse. Pour déterminer si les premiers modes sont globaux, il suffit de vérifier si les masses mobilisées par ces modes représentent une part importante de la masse totale du bâtiment. En revanche, si la masse en mouvement est faible, cela indique très probablement qu'il s'agit d'un mode local.

IV. Outils d'analyse

Ce chapitre est consacré à la présentation des outils utilisés pour réaliser l'analyse sismique. Les deux premiers sont des outils

A. Arche Ossature

Arche Ossature, édité par GRAITEC, est un logiciel de calcul de structures en béton armé. Il offre plusieurs avantages, notamment une facilité de modélisation des bâtiments, des outils de vérification du modèle et des modules de ferrailage.

Le logigramme suivant sert à décrire le fonctionnement du logiciel.

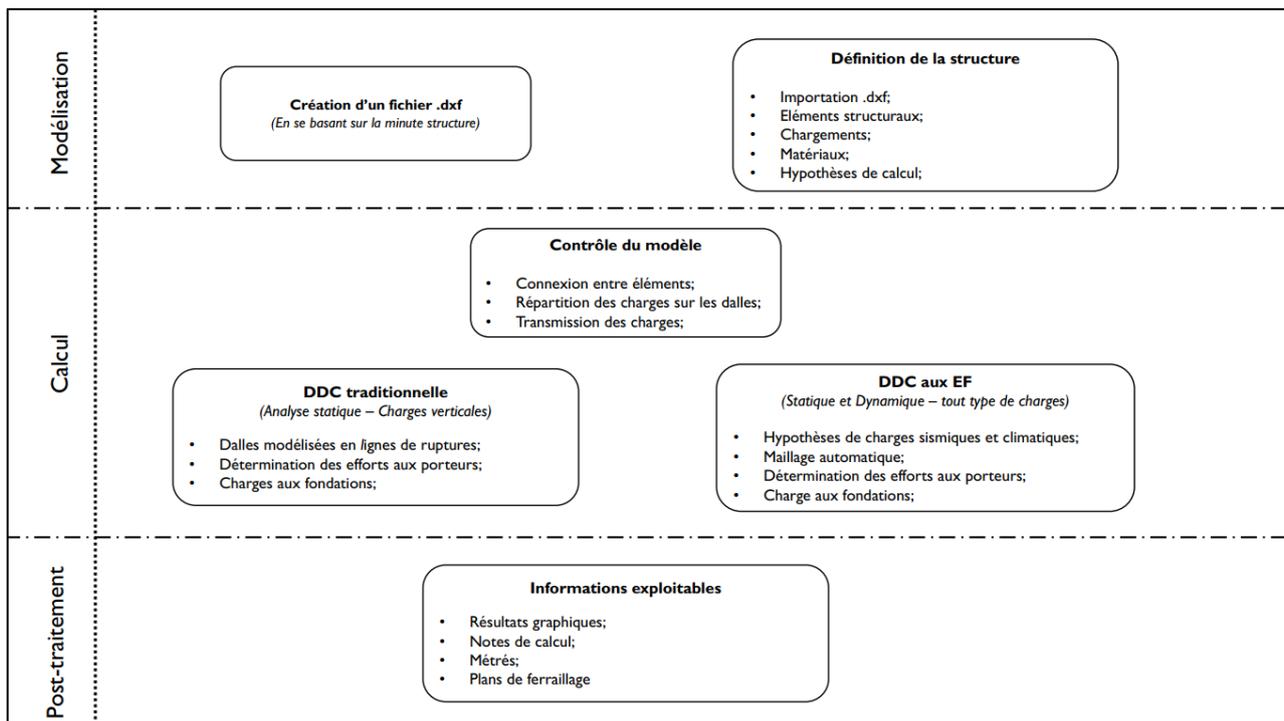


Figure 19 - Logigramme d'une modélisation sur Arche Ossature

1. Modélisation

La facilité de modélisation est rendue possible grâce à la fonction d'importation de fichiers DXF, créés sur des logiciels de CAO 2D. Avant de débiter un nouveau modèle de structure dans Arche Ossature, il est intéressant de réaliser une minute structure afin d'établir les plans de principes structuraux. Ces plans servent de première approche pour comprendre le fonctionnement de la structure et permettent de créer les fonds de plan au format DXF.

En outre, la minute structure joue un rôle crucial lors de la vérification des sorties du logiciel. Lorsque le modèle présente un certain niveau de complexité, il est possible d'obtenir une variété de sollicitations sur les éléments. Dans ce cas, la minute structure est utilisée pour confronter les prévisions initiales avec les calculs effectués par le logiciel.

Une fois que l'importation est réussie, il est nécessaire de saisir les différents éléments de la structure tels que les dalles, poutres, linteaux, poteaux, voiles, semelles isolées et filantes. Des informations telles que les dimensions, les hypothèses de calcul et le style de ferrailage doivent être saisies. Le processus de saisie est

répété étage par étage sur un plan bidimensionnel, ce qui permet de construire le modèle 3D sans nécessiter de manipulation spatiale des éléments. Cette approche de travail est appréciée car elle rappelle le travail que les ingénieurs effectuent traditionnellement sur papier. Ci-dessous un exemple représentatif de la modélisation 2D sur Arche Ossature.

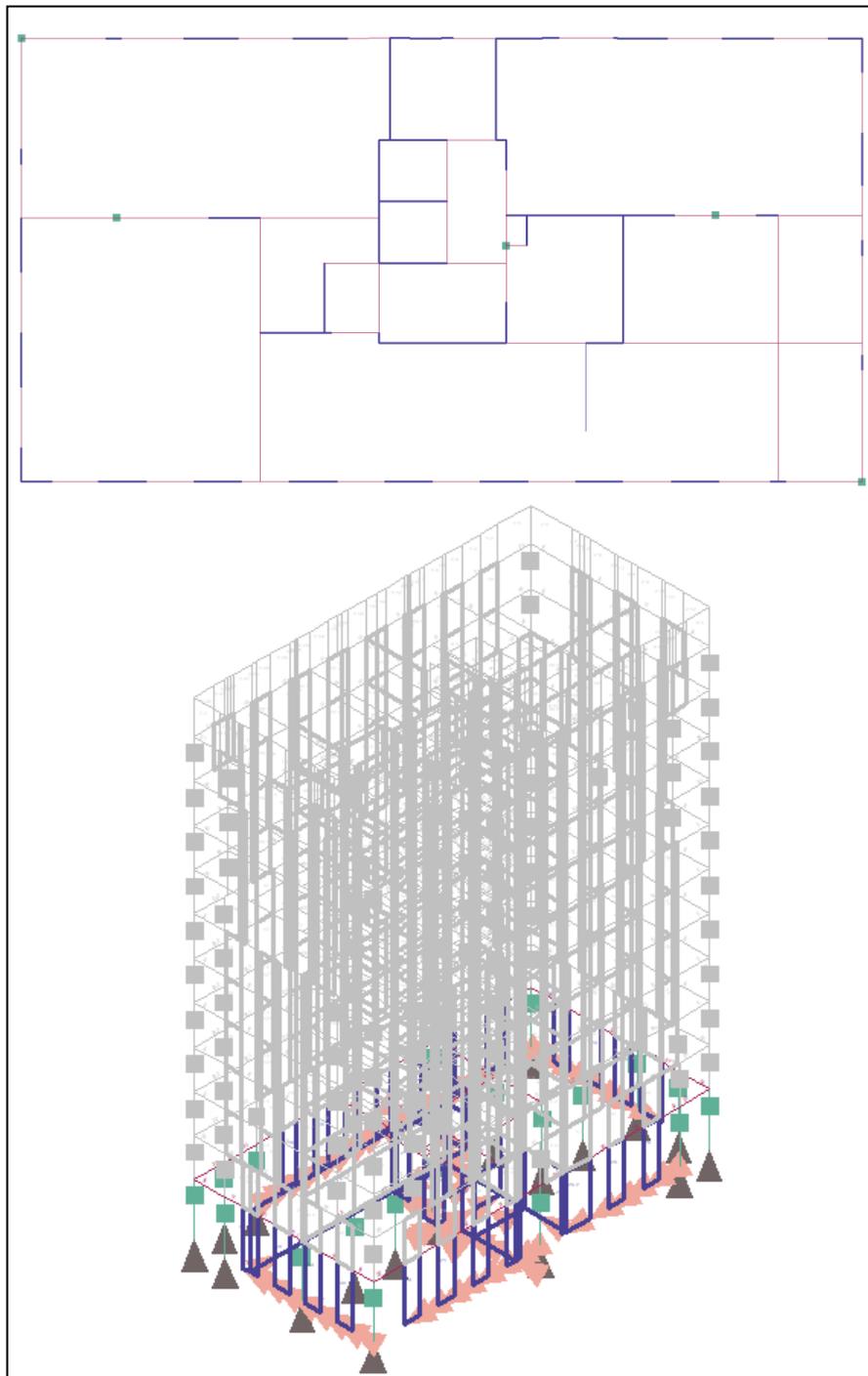


Figure 20 - Exemple de la modélisation des éléments porteurs d'un étage en 2D (en haut) et la perspective du bâtiment en 3D (en bas)

Concernant les matériaux, le logiciel propose une bibliothèque contenant les classes de béton. Il est également possible d'ajouter un matériau personnalisé en fonction des besoins. Au vu de la variété de matériaux employés actuellement au BTP, on peut être amené à utiliser un matériau outre que le béton ou même modéliser l'élément à une épaisseur équivalente en béton armé. Cette équivalence est obtenue en faisant le rapport au ratio des poids volumiques des matériaux. Cependant, il est important de noter que le

logiciel réalise uniquement le dimensionnement des porteurs en béton armé, et ne traite pas les autres matériaux.

L'un des points de vigilance auquel il faut faire attention sur Arche Ossature est la configuration de points d'accrochage. Pendant la phase de préparation du modèle, il est courant d'effectuer des ajustements de modélisation, ce qui peut parfois nécessiter d'une manipulation plus spécifique du logiciel. Dans l'onglet "Modifier", on peut trouver différents modes d'accrochage tels que l'accrochage par point, intersection, perpendicularité, etc. Ces options permettent de placer les points d'accrochage de manière précise, déterminant ainsi les connexions entre les éléments de la structure. Ci-dessous le ruban affichant les modes d'accrochage les plus utilisés :

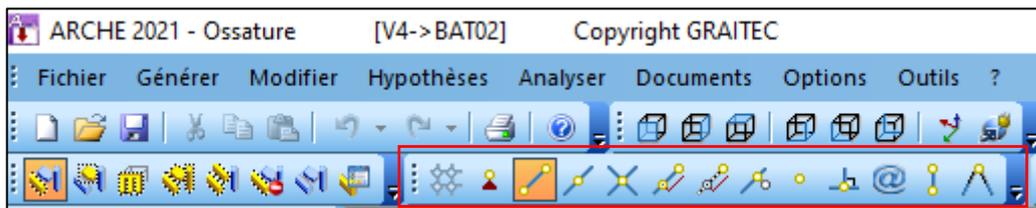


Figure 21 - Ruban Mode d'accrochage

Un autre point sensible dans le logiciel est la gestion des intersections de poutres. Lorsque des poutres se croisent ou se rejoignent, on doit déclarer un ordre de priorité entre elles dans l'onglet des propriétés des poutres. Cela signifie que les poutres classées comme principales font office d'appui aux poutres de classe secondaire, créant ainsi une hiérarchie dans le système structurel.

Cependant, il se peut que, dans un réseau complexe de poutres, le classement de priorité ne suffise pas à établir une descente de charges cohérente, surtout lorsque deux poutres secondaires se croisent. Dans ce cas, il est nécessaire d'identifier les configurations probables qui peuvent se produire :

- Configuration en T : Dans ce cas, la poutre continue est considérée comme principale, tandis que la poutre coupée est considérée comme secondaire et prend appui sur la poutre principale.
- Configuration en L : La numérotation des poutres règle la relation porteur/porté. Le logiciel fera reposer la poutre ayant le numéro le plus élevé sur la poutre ayant le numéro plus faible.
- Configuration en croix : Deux solutions sont possibles. La première est le cas où les deux poutres sont modélisées continues alors il faut déclarer une d'entre elles porteuse (par défaut la case *Classe Principale* est cochée) et l'autre portée (décocher la case *Classe Principale*). La seconde consiste à découper la poutre secondaire.

Dans l'image ci-dessous on illustre les configurations mentionnées plus haut :

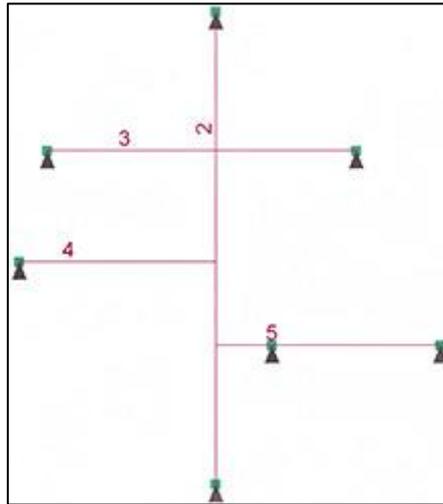


Figure 22 - Configuration probables d'intersection de poutres

Ces paramétrages sont essentiels pour assurer la cohérence structurelle et le bon comportement du modèle dans le logiciel. Utiliser correctement les points d'accrochage et gérer judicieusement les intersections de poutres, assure une modélisation réussie correspondante à la structure à construire.

2. Calcul

La phase de calcul démarre par les vérifications. Arche Ossature dispose d'outils de vérification accessibles dans la barre d'outils Mode d'analyse où l'on peut en visualiser graphiquement. Dans une démarche logique suivant la descente des charges, on va s'intéresser d'abord à la vérification du sens de portée des dalles. Avec l'outil *Report de charge dalle active* est possible de visualiser les lignes de ruptures calculées par le logiciel. Ici il s'agit alors d'assurer la cohérence entre ce qui était établi à la modélisation et ce qui était calculé par le principe des travaux virtuels. Dans l'image ci-dessous on présente l'outil report de de charge :

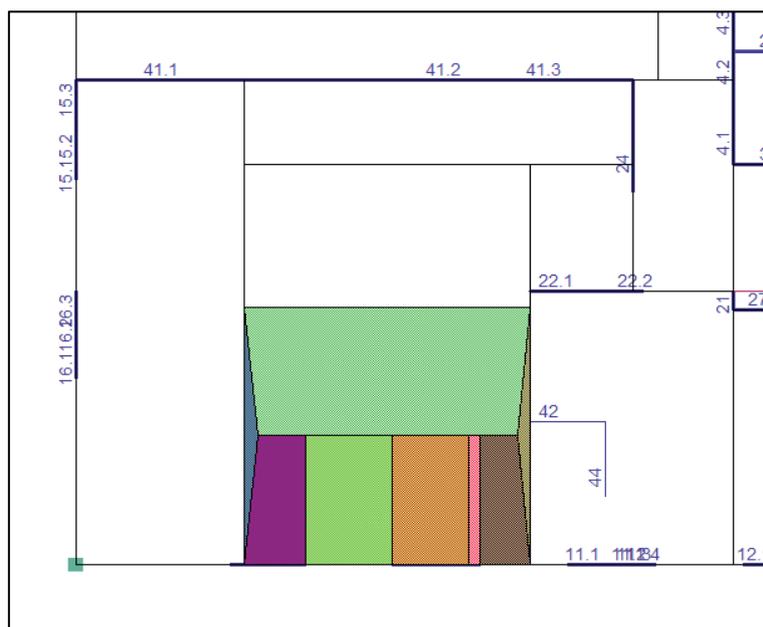


Figure 23 - Affichage de la répartition de charge d'une dalle à l'aide de l'outil Report de charge

Ensuite on passe aux vérifications des éléments de barre. Il est possible d'afficher l'affectation des hiérarchies des réseaux de poutres par l'outil *Montrer liaisons entre éléments*, de façon pareille les outils *Sonder les éléments sélectionnés* et *Afficher les influences sur les éléments sélectionnés* participent dans cette partie de contrôle du modèle. Un exemple d'une vérification de contrôle afin de cerner le cheminement des charges aux porteurs horizontaux est exposé à l'image suivante :

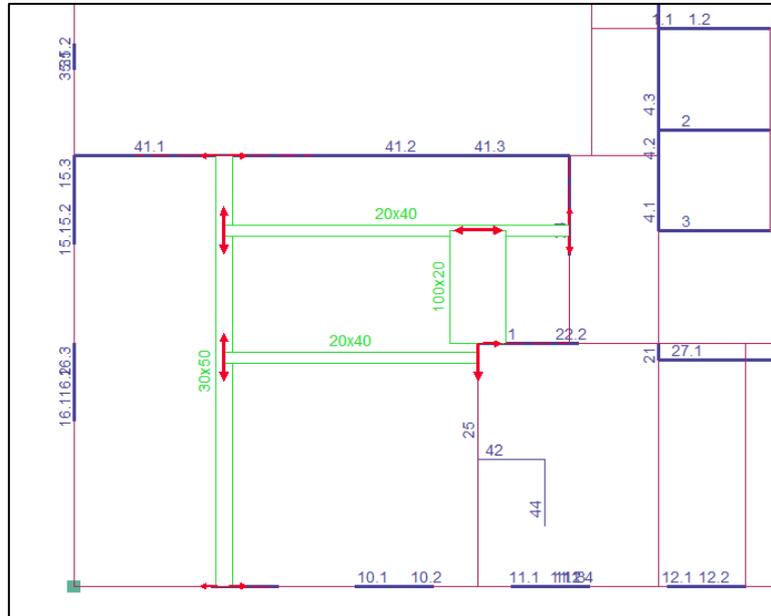


Figure 24 - Affichage de la transition des charges d'un réseau de poutres

Concernant l'analyse aux éléments finis, Arche Ossature présente un inconvénient concernant son générateur de maille. Le maillage est façonné automatiquement par le logiciel qui a des options de paramétrage assez limitées. La seule personnalisation disponible est la définition de la taille des éléments. Il est donc impossible de changer le type d'élément fini, la méthode de maillage et la régularité du maillage options qui contribuent énormément à la qualité des sorties au post-traitement du logiciel. Ainsi, il est important de relever la difficulté d'appréhender les erreurs de maillage, une fois détectées Arche Ossature arrête les calculs et une fenêtre avec un message d'erreur apparaît.

3. Analyse modale et dynamique

Sur Arche Ossature, le lancement des calculs pour l'analyse modale et dynamique s'effectue à l'aide du même outil, ce qui diffère de son concurrent qui permet d'abord l'analyse modale, puis l'analyse dynamique. Cela constitue un inconvénient pour le logiciel car les calculs dynamiques sont assez longs et pouvoir valider l'analyse modale avant de lancer les calculs dynamiques évite d'avoir un résultat non-exploitable tardivement.

La configuration des paramètres se fait de manière aisée et conforme à l'Eurocode 8. À cet égard, la simplicité d'Arche est un avantage, car tous les paramètres nécessaires à l'analyse sismique sont accessibles sans pour autant complexifier son utilisation.

Voici un exemple de configuration des hypothèses sismiques :

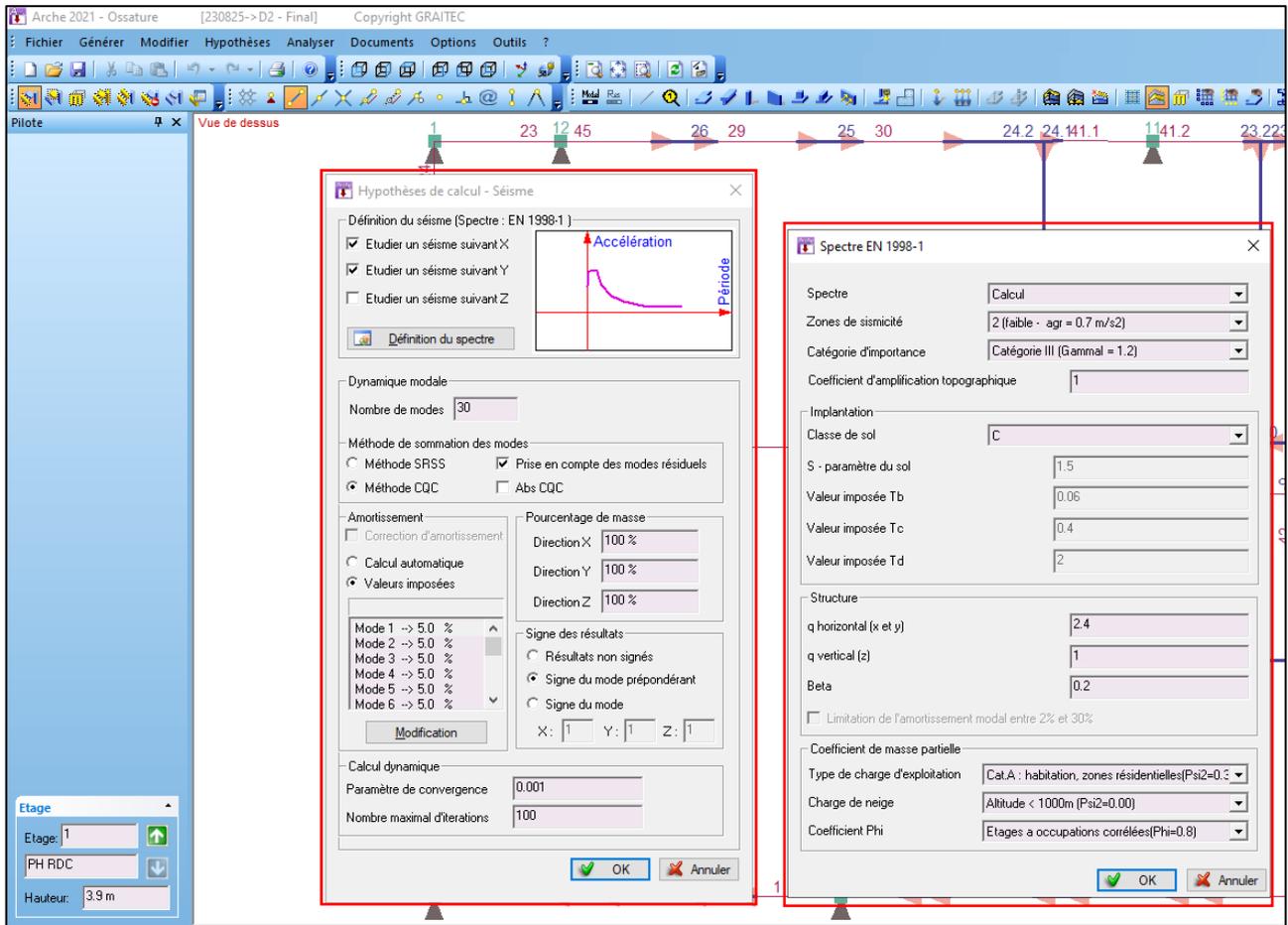


Figure 25 - Hypothèses de calcul d'analyse sismique sur Arche Ossature

Pour effectuer une analyse sismique, il est impératif que le modèle dans Arche soit un modèle aux éléments finis exempt d'erreurs de modélisation afin de permettre la génération du maillage. À cette étape, il est vivement recommandé de valider le modèle aux éléments avant de lancer le calcul sismique, étant donné que le logiciel peut rencontrer des difficultés lors du passage direct d'une analyse statique selon la méthode traditionnelle à un modèle d'analyse sismique basé sur les éléments finis.

Parfois, il peut s'avérer nécessaire de modéliser étage par étage afin de garantir la génération du maillage. En effet, mailler l'intégralité du modèle sans une validation partielle par tronçons d'étages du bâtiment peut entraîner de nombreuses erreurs, ce qui complique la compréhension des messages d'erreur générés par le logiciel.

B. Robot Structural Analysis

Robot Structural Analysis est un logiciel dédié à la modélisation, analyse et dimensionnement de différents types de structures. Ses principales caractéristiques sont :

- La définition de la structure en mode entièrement graphique ;
- Représentation graphique de la structure modélisée mais aussi ses efforts internes, déplacements, tableaux... ;
- Possibilité d'effectuer analyses statiques et dynamiques.

La création du logiciel remonte aux années quatre-vingt quand André Niznik a développé un logiciel de calcul structures aux éléments finis pour son doctorat à l'INSA de Toulouse sous le nom de Robobat. En 2008 Robobat est racheté par Autodesk qui détient jusqu'aujourd'hui les droits d'utilisation.

1. Modélisation

La modélisation sur Robot se réalise au moyen de logiciels DAO, en important des calques au format DXF, ce qui permet une saisie assez rapide. Cette étape présente des similarités avec les méthodes de construction de modèles dans le logiciel Arche.

Lors de la phase de modélisation, Robot se distingue notamment par la variété des paramètres accessibles à l'utilisateur, ce qui permet la création de modèles complexes ayant une grande fidélité à la réalité. Cependant, il est important que l'utilisateur fasse preuve de prudence en manipulant ces paramètres, car l'introduction de complexités dans le modèle pourrait perturber les calculs exécutés par le logiciel. De plus, l'exploitation des résultats tend à devenir plus complexe avec l'ajout de caractéristiques supplémentaires au modèle.

On voit sur la figure suivante le ruban *Structure* qui est très utile lors de la saisie de la structure.

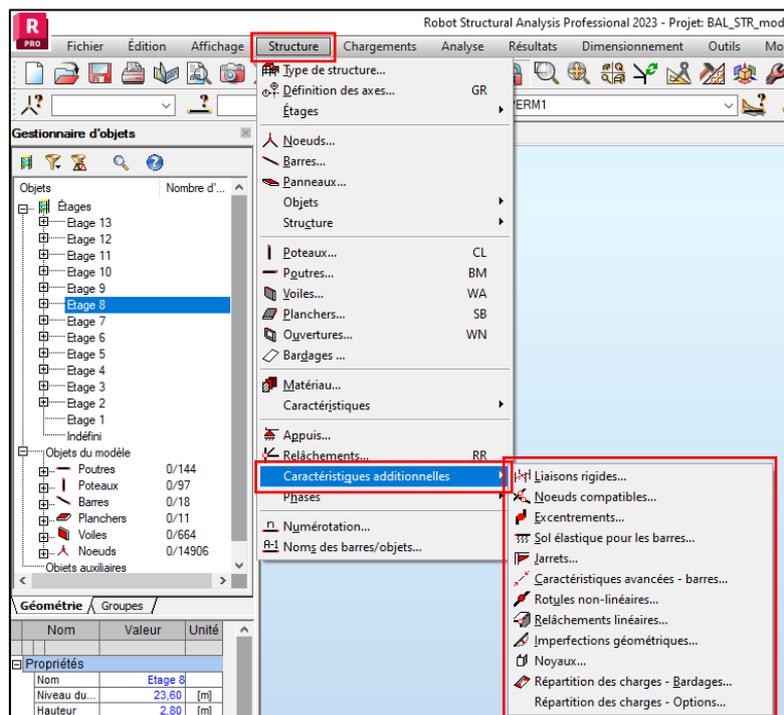


Figure 26 - Ruban Structure sur Robot et le menu Caractéristiques additionnelles

En plus Robot propose une boîte de dialogue qui permet la sélection de nœuds, de barres, et de panneaux. Cet outil de sélection est particulièrement intéressant pour la modélisation d'une structure à plusieurs éléments puisqu'au fil du projet ont est souvent amené à effectuer des modifications des dimensions de ces éléments. Alors pour réaliser ces modifications sur Robot il suffit d'ouvrir la boîte de sélection et créer un filtre de ce qu'on veut sélectionner. Ci-dessous un exemple de sélection de tous les panneaux dans modèle avec un filtre d'épaisseur.

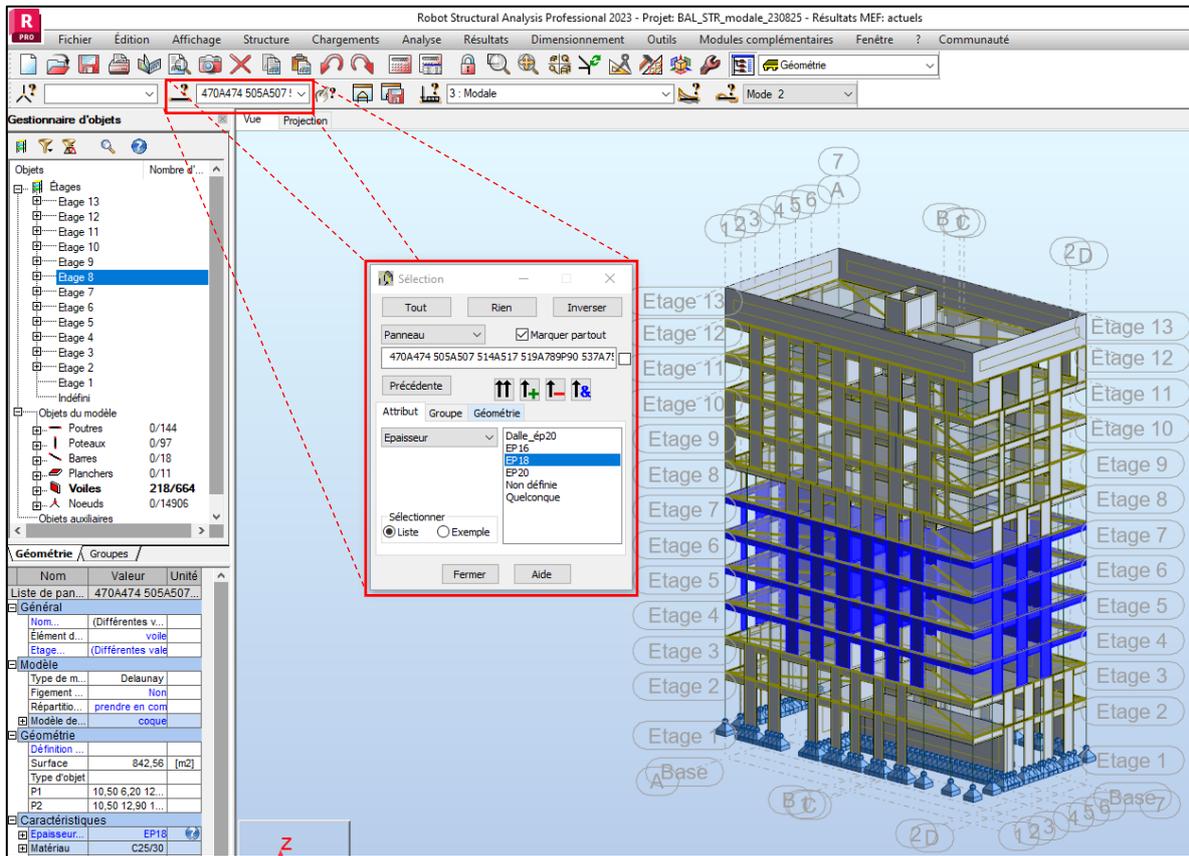


Figure 27 - Sélection de voiles filtrés par leur épaisseur

2. Méthode des éléments finis

Dans Robot, la méthode des éléments finis s'intègre de manière fluide à l'interface du logiciel. Il permet la modélisation d'éléments de type barre avec plusieurs degrés de liberté, ainsi que de surfaces sous type d'éléments de coques, de diaphragmes rigides et de panneaux rigides. La modélisation d'éléments solides est également envisageable en extrudant une surface, mais cette approche reste limitée à des cas spécifiques.

Le processus de maillage est géré de manière efficace par le logiciel, ce qui se traduit par des temps de génération de maillage relativement courts pour les bâtiments. Cet aspect constitue un avantage considérable pour Robot, car le temps d'attente pendant le processus de maillage peut laisser l'ingénieur oisif. Par exemple, alors qu'une modélisation dans Arche Ossature peut prendre plus de trente minutes en raison de difficultés dans la création des mailles, sur Robot, cela pourrait être réalisé en moins de dix minutes. Cependant, il est essentiel de noter que la finalisation du maillage de la structure ne garantit pas la précision du modèle. Des ajustements peuvent être nécessaires après la génération du maillage, ce qui rallonge la

durée de cette étape. Cela souligne l'importance d'une modélisation minutieuse et d'un paramétrage précis du modèle.

Le logiciel Robot propose deux méthodes de maillage pour les surfaces : la triangulation de Delaunay et la méthode Coon. La première permet un maillage sur n'importe quelle surface et offre la possibilité d'ajouter des nœuds supplémentaires pour éviter les éléments dégénérés, notamment aux coins où les gradients de contraintes sont importants. La méthode Coons repose sur des éléments triangulaires ou quadrangulaires avec des côtés divisés de manière égale, assurant un maillage régulier en suivant la forme de la surface. Cette approche est idéale pour obtenir un maillage uniforme en deux dimensions.

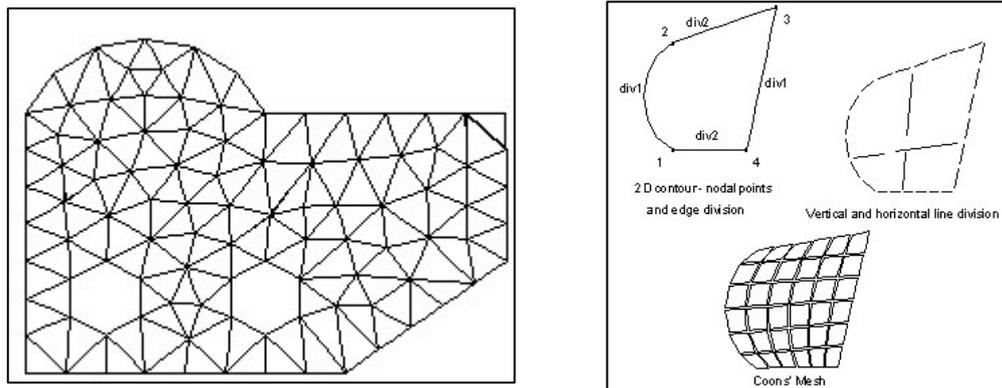


Figure 28 – Exemple des maillages : Delaunay (à gauche) et Coons (à droite)

En ce qui concerne les orientations des systèmes de repères locaux, les bonnes pratiques suggèrent d'observer les règles suivantes :

- Axe X local : Sens positif coïncidant avec l'axe global. Point « extrémité » à droite du point « origine ».
- Axe Y local : Sens positif coïncidant avec l'axe global. Point « extrémité » en haut du point « origine ».
- Axe Z local : Suivant la règle de la main droite en respectant les deux règles antérieures.

Bien que Robot offre une grande possibilité de paramétrage et d'outils pour avoir représentation numérique précise du bâtiment, il est important de noter qu'il existe des limitations au logiciel, en particulier en ce qui concerne la prise en compte de la raideur des éléments. Par conséquent, chercher une modélisation géométrique parfaite peut être inutile car il y aura toujours une imprécision dans le modèle.

A titre d'exemple, dans une analyse sismique le but principal de la modélisation de la structure est de tenir en compte le plus correctement possible de la masse et de la raideur des éléments de la structure. En général, les calculs des masses et leurs positions sont faciles à reproduire précisément sur le logiciel, tandis que les raideurs sont souvent très approchées.

Cela découle du fait que la raideur est une grandeur dépendante du produit de l'inertie par le module d'élasticité qui peut être altéré selon le degré de fissuration de l'élément. Étant donné que le calcul de fissuration pour les éléments en béton armé est loin d'être une tâche simple ni précise, il devient évident qu'un niveau excessif de détail dans la modélisation, dans le seul but d'obtenir une réplique parfaite de la structure construite, est superflu.

3. Analyse modale

L'analyse modale sur Robot n'est pas réalisée par défaut sur Robot. On doit déclarer alors un cas de charge modale dans le ruban *Analyse*.

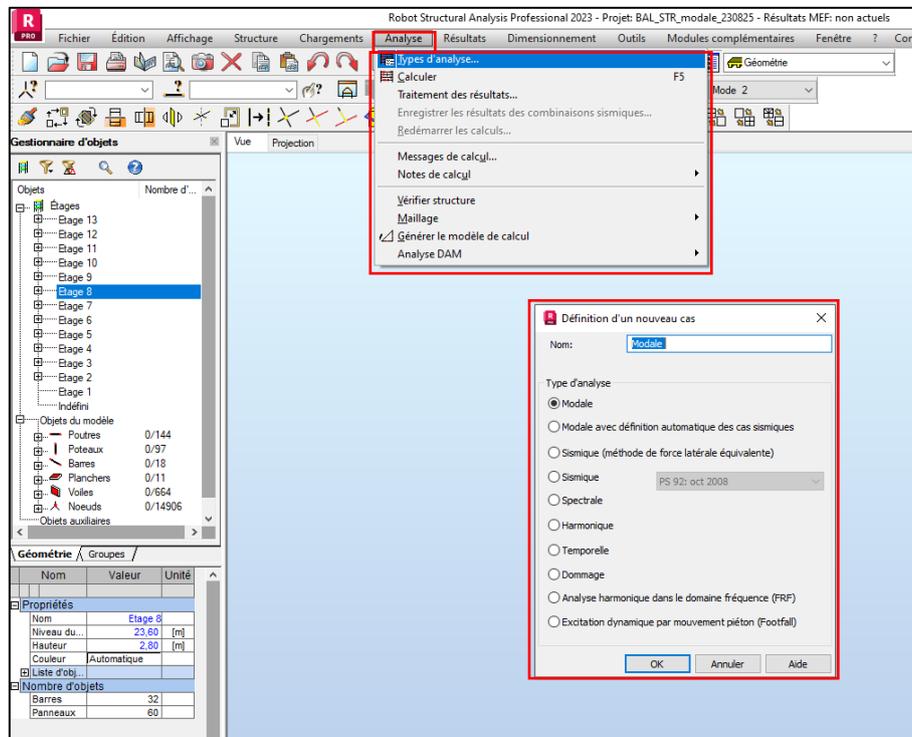


Figure 29 - Déclaration de l'analyse modale sur Robot

Lors de la configuration de l'analyse modale, il est nécessaire de renseigner le nombre de modes à calculer. Comme mentionné précédemment, ce nombre est dépendant de la complexité du modèle à étudier. Toutefois, l'Eurocode 8 impose une condition selon laquelle une analyse modale doit être jugée représentative uniquement si la somme des masses mobilisées par tous les modes parvient à mobiliser au moins 90% de la masse totale du bâtiment.

D'autres paramètres de configuration sont également essentiels avant de lancer l'analyse modale, tels que le type de matrice de masse et la vérification Sturm.

Le premier paramètre intervient sur la précision du calcul des masses des éléments modélisés ainsi que le temps de calcul. L'utilisateur a la liberté de choisir entre une matrice de masse prenant en compte l'énergie cinétique de manière complète - répartie sur la surface avec translation et rotation - ou de manière simplifiée - concentrée aux nœuds avec uniquement des translations.

La vérification Sturm, un algorithme de Robot, joue un rôle important en filtrant les modes de vibration pour mettre en évidence les modes les plus pertinents du bâtiment. Cette fonctionnalité détecte automatiquement les modes locaux en réduisant la tolérance prédéfinie des paramètres, puis relance le calcul afin d'identifier les premiers modes propres de vibration représentatifs du bâtiment.

Avant de finaliser l'analyse modale, plusieurs contrôles doivent être effectués. Ils englobent la vérification de la cohérence entre les masses prises en compte et la masse totale de la structure, ainsi que la confirmation du respect des conditions limites.

En ce qui concerne les périodes fondamentales, on peut estimer que la période du mode fondamental est approximativement égale à 1/20ème du nombre d'étages. Par exemple, pour un bâtiment en R+10, une période fondamentale proche de 0.5 seconde est attendue après les calculs du logiciel.

4. Analyse dynamique

L'analyse dynamique est conduite suite à l'analyse modale, une fois que les modes de vibration principaux du bâtiment ont été obtenus. Cette étape commence par la transformation des charges statiques en masses. Le processus est relativement simple : les cas de charge créés dans l'analyse statique sont ajustés en leur appliquant les coefficients réglementaires de l'Eurocode 8.

Ensuite, il est nécessaire de déclarer les cas de charge sismiques pour permettre l'exploitation des déplacements, des efforts internes et des réactions d'appui qui surviendraient lors d'un séisme. Dans le même volet "Analyse", l'option "Sismique" est sélectionnée, et ce faisant, trois cas de charge sismiques sont définis, correspondant chacun aux trois directions de l'espace.

En outre, il est nécessaire de définir le spectre de réponse élastique qui sera pris en compte lors de l'analyse sismique. Ce paramètre garde une importance capitale, car il reflète la pérennité du bâtiment tant en termes de résistance que de sa fonction après un séisme majeur.

Une autre étape importante est la signature des modes. Cela simplifie l'exploitation des résultats lorsqu'il s'agit de dimensionner un élément en utilisant son torseur d'efforts. Après l'analyse modale, le signe des efforts est perdu, d'où l'importance de cette étape. Négliger cette démarche peut conduire à un dimensionnement erroné, car l'inversion des signes des efforts modifie fondamentalement le calcul de la résistance d'un élément.

Par exemple, après une analyse dynamique, si l'on saute la signature des modes, on peut réaliser le dimensionnement d'un poteau qui présente un torseur d'efforts avec une charge normale de -100 kN (compression). Cependant, si les modes avaient été signés correctement, le poteau pourrait être sollicité en réalité par une force de 100 kN (traction). On voit clairement que le dimensionnement est faux car le béton en traction ne travaille pas de la même façon qu'en compression.

L'image ci-dessous présente l'enjeu de la signature des modes.

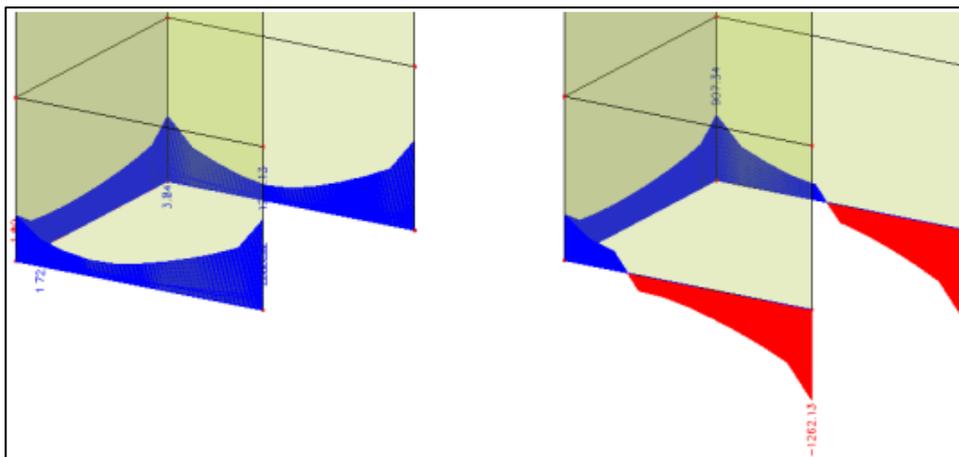


Figure 30 - Efforts membranaires d'un bloc de voiles d'un noyau avant la signature des modes (à gauche) et après la signature (à droite)

C. Méthode des forces latérales

La méthode de calcul des forces latérales est un calcul des efforts sismiques simple adapté principalement aux bâtiments qui présentent une élévation régulière. Cependant, elle peut être appliquée de manière indicative, même aux structures moins régulières, afin d'estimer approximativement les niveaux d'efforts sismiques. La période fondamentale du bâtiment est calculée forfaitairement conforme à l'article [EC8-1/4.3.3.2.2-(3)], permet de se faire une idée sur l'ordre de grandeur des efforts sismiques,

$$T_1 = C_t * H^{3/4}$$

Où la valeur de C_t est tributaire du système de contreventement du bâtiment selon la direction calculée.

V. Projet Lille Metropolitan Square : Conception Parasismique

Le projet porte sur la conception d'une tour comprenant 37 logements sociaux et une crèche au rez-de-chaussée à Lille. Ce projet s'insère dans un ensemble d'immeuble classifiés dans quatre lots de bâtiments. Dans sa globalité le projet développe un total de 87 000m² de plancher dont 9160m² concerne le lot du bâtiment D2 confié à Make ingénierie.

A l'heure actuelle et pour les limites de notre étude le projet est en phase APS.



Figure 31 - Plan de masse Lot D Lille Metropolitan Square

Le bâtiment d'étude D2 s'organise de la manière suivante :

- Un niveau en sous-sol avec un parking ; Dû à la phase du projet la modélisation de ce niveau n'est pas pris en compte.
- Une crèche au rez-de-chaussée ;
- 10 étages pour habitation ;
- Bâtiment en béton armé avec un noyau contenant les gaines palières, les sanitaires ainsi que les circulations verticales (deux ascenseurs et un escalier) ;
- Toiture terrasse végétalisée ;

L'un des enjeux majeurs de ce projet ce qu'il a été conçu pour être vu de tous les côtés et alors il y a un travail exhaustif au niveau des façades. Elles sont marquées par des variations de rythme dans la trame qui font apparaître plusieurs strates horizontales.

L'image suivant affiche la façade du bâtiment animée par la trame variée du bâtiment :



Figure 32 - Ondulation sur la façade du bâtiment D2

Au cours de l'étude, une attention minutieuse a été portée à cette façade en raison de sa configuration de trame irrégulière en élévation. Cette irrégularité a eu des répercussions sur le système de contreventement du bâtiment, du fait de la discontinuité de ces éléments.



Figure 33 - Perspective du lot D depuis la rue. Bâtiment D2 au centre

A. Hypothèses

1. Géométrie

- Hauteur : $H = 33.44$ m ;
- Dimension en plan : 24.75×12.90 m² ;
- Epaisseur des voiles intérieurs :
 - Séparation entre logements : 20 cm ;
 - Séparation logements/circulation : 18 cm ;
- Epaisseur des voiles de façade :
 - Du R+10 au R+7 : 16 cm ;
 - Du R+6 au R+2 : 18 cm ;
 - Du R+1 au RDC : 20 cm ;
- Epaisseur des planchers : 20 cm ;

2. Charges

- Poids propre calculé automatiquement à partir de la géométrie ;
- Charges permanentes : $G = 1.5$ kN/m² ;
- Charges d'exploitation : $Q = 2$ kN/m² et 2.5 kN/m² ;

3. Matériaux

- Béton armé : C25/30 ;
- Acier : 500B.

B. Hypothèse sismique

Les hypothèses sismiques ont été formulées en s'appuyant au zonage sismique à la ville de Lille, à la catégorie d'importance et aux études géotechniques réalisées sur site.

- Zone de sismicité 2 : $a_{gr} = 0.7$ m/s² ;
- Catégorie d'importance III : $\gamma_I = 1.2$;
- Classe de sol C : $V_{s,30} = 300$ à 310 m/s, $S = 1.5$;
- Accélération d'ancrage au sol : $a_g = 0.7 * 1.2 * 1.5 = 1.26$ m/s².

Ci-dessous la localisation du bâtiment d'étude sur la carte de zonage sismique française :

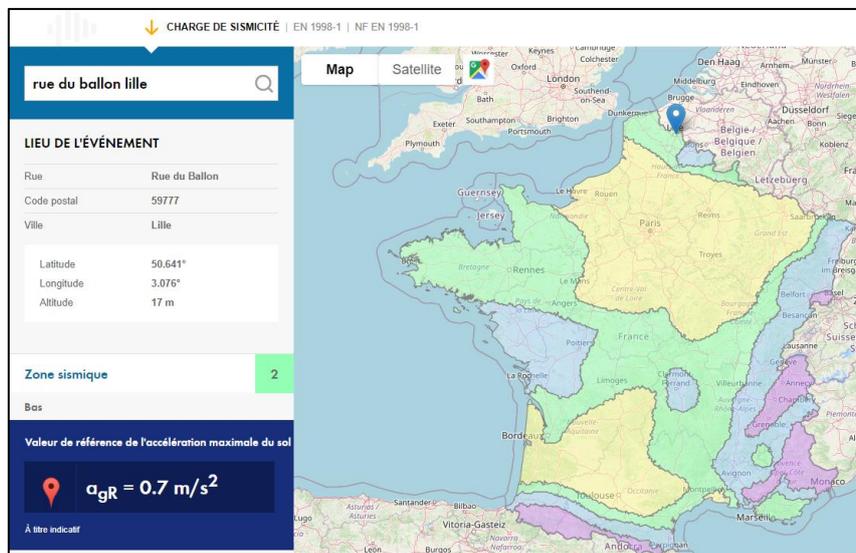


Figure 34 - Localisation du projet sur la carte de zonage sismique

1. Examen préalable de la structure du bâtiment

Avant la modélisation proprement dite, il est nécessaire d'appréhender la forme du bâtiment. Cela permettra d'estimer qualitativement la régularité en plan et élévation mais aussi identifier les éléments sismiques primaires et secondaires. Ci-dessous le plan des porteurs au rez-de-chaussée :

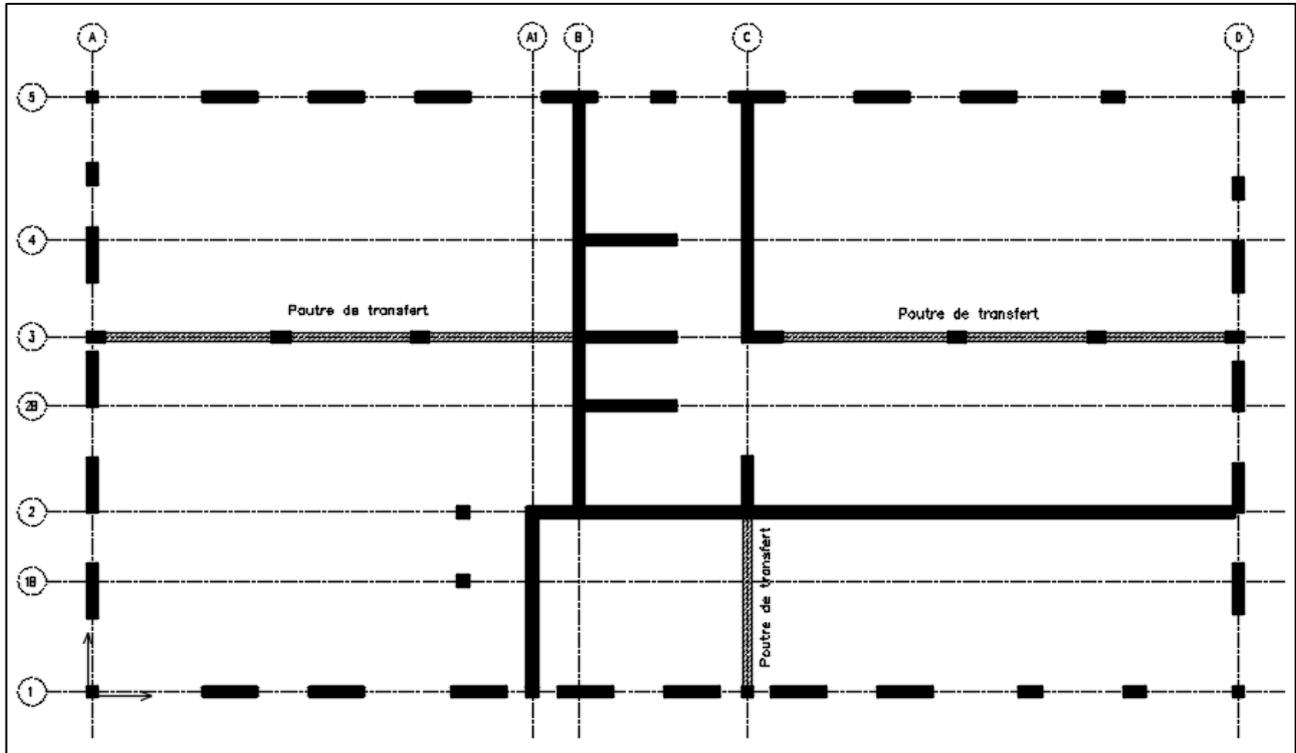


Figure 35 - Plan des éléments porteurs au RDC

Dans une première analyse, nous pouvons constater que le plan du bâtiment est constitué d'un contour rectangulaire, avec une géométrie compacte, ainsi qu'une quasi-symétrie des voiles dans chaque direction. La distribution des raideurs et des masses est relativement symétrique. Les calculs d'élanement, excentricités et rayons de girations sont sur l'Annexe. Cette disposition nous permet d'évaluer le bâtiment comme quasi régulier en plan. En ce qui concerne l'élévation, on note la continuité du noyau central en toute hauteur du bâtiment, en revanche les voiles de périphérie qui rythment la façade ne peuvent pas être considérés réguliers. On doit donc considérer la structure irrégulière en élévation, ce qui aura un impact au niveau de la définition du coefficient de comportement.

A l'aide d'une feuille Excel, en Annexe, on calcul les centres de masse et torsion du bâtiment affichés ci-dessous :

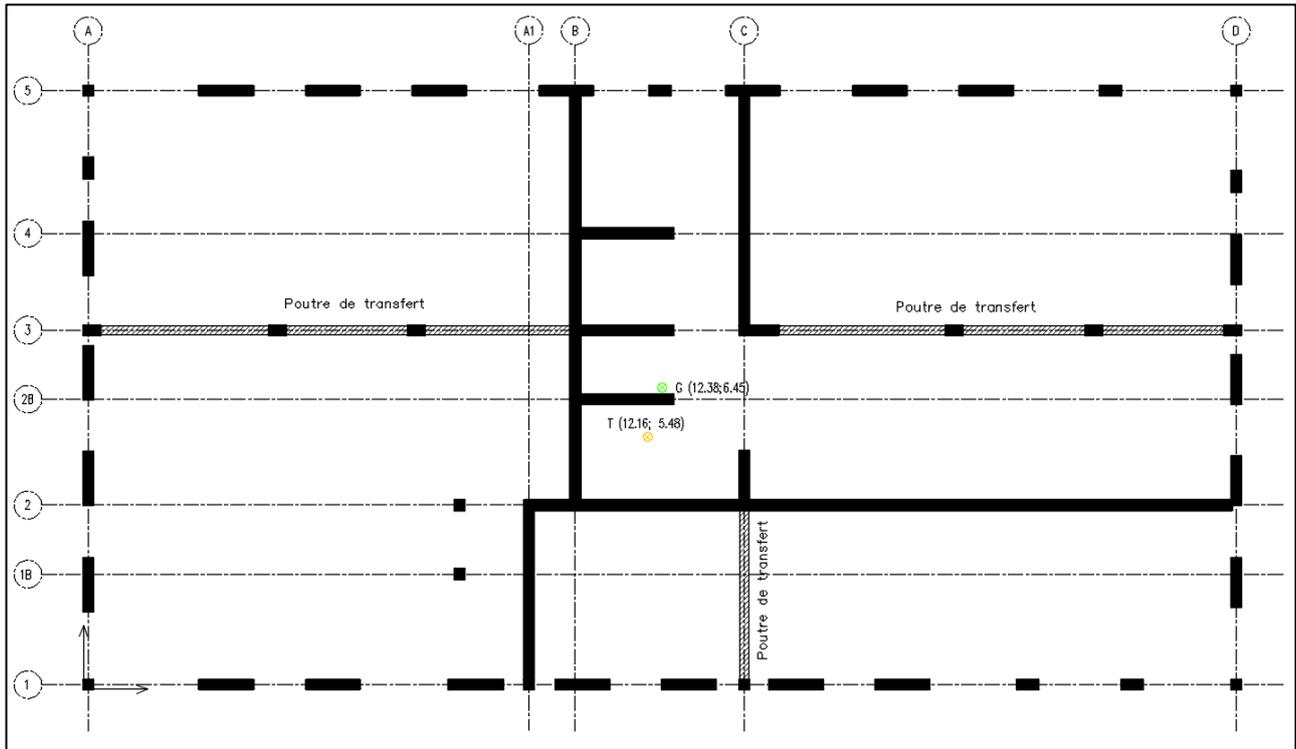


Figure 36 - Centre de gravité (en vert) et de torsion (en jaune) au RDC

2. Définition des éléments sismiques

Ensuite, nous passons à la définition des éléments sismiques principaux et secondaires. Les éléments sismiques primaires sont conçus, modélisés et analysés dans le but d'assurer le contreventement du bâtiment face aux sollicitations sismiques. En revanche, les éléments secondaires ont leur résistance et leur rigidité négligées par rapport aux actions sismiques. Il convient de noter que cette classification s'applique uniquement lorsqu'une analyse sismique est réalisée, car les deux types d'éléments sont toujours conçus et étudiés pour résister les charges gravitaires.

Une première analyse des éléments porteurs en plan permet d'évaluer quels éléments sont capables de résister les actions sismiques. Le choix implicite consiste à considérer les voiles de périphérie, le noyau de contreventement et les files 2 et B comme les éléments sismiques principaux, tandis que le reste est considéré comme secondaire. Pour valider cette hypothèse, nous appliquons une charge unitaire au sommet du bâtiment pour chaque direction et étudions la répartition des charges reprises par chaque refend. On a vérifié que les ESS ne reprennent plus que 15 % de l'effort tranchant de l'étage.

Ci-dessous la vue en plan des éléments principaux et secondaires :

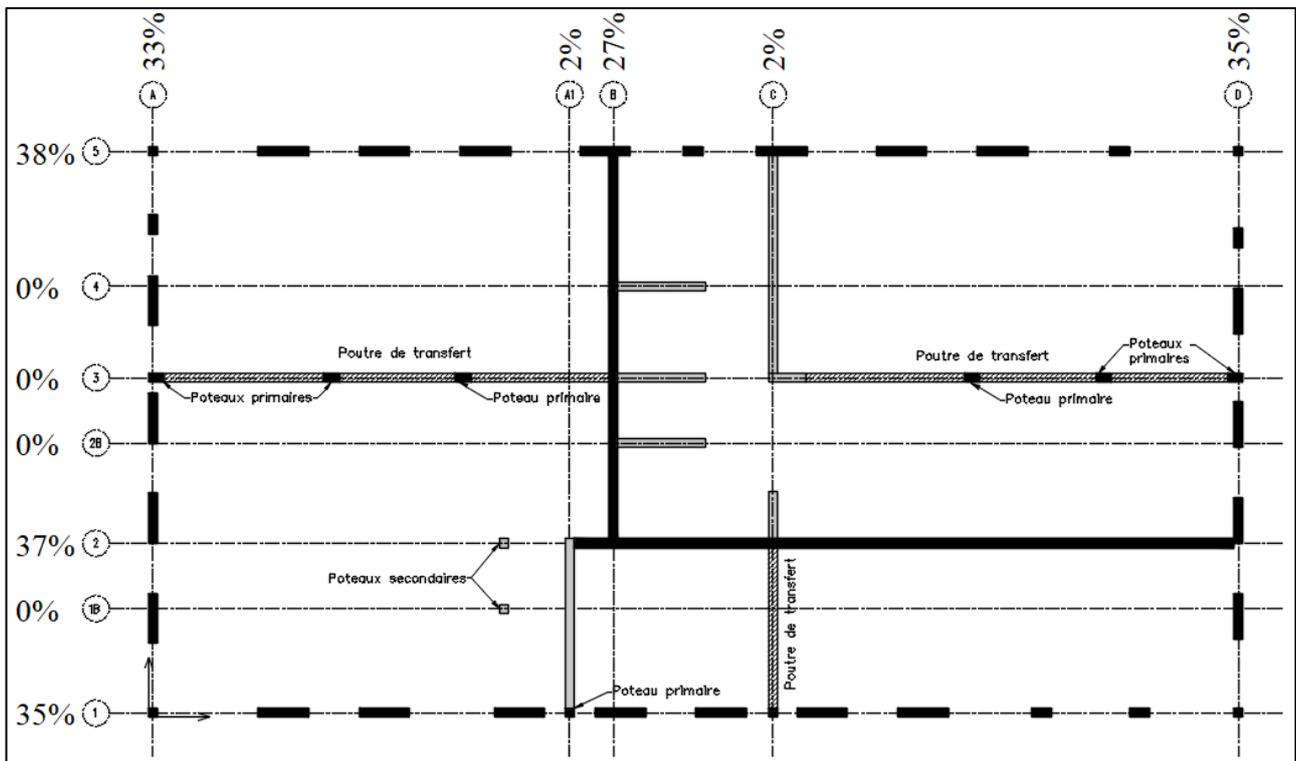


Figure 37 - Plan de repérage des éléments sismiques principaux (en noir) et secondaires (en gris)

Il est à noter que les poutres et poteaux qui supportent les éléments sismiques primaires doivent être considérés également comme éléments primaires même que leur contribution dans la répartition des efforts tranchants sismiques ne les oblige pas.

L'annexe figure les élévations qui permettent de repérer les éléments sismiques et leur respective classification.

Finalement, on dresse le tableau suivant.

<i>Files numériques</i>	<i>Files alphabétiques</i>
File 1 : ESP, en totalité	File A : ESP, en totalité
File 2 : ESP, en totalité	File A1 : ESS, en totalité
File 2B : ESS, en totalité	File B : ESP, en totalité
File 3 : voile ESS ; Poteaux et Poutres ESP	File C : ESS, en totalité + poteau ESP
File 4 : ESS, en totalité	File D : ESP, en totalité
File 5 : ESP, en totalité	

Figure 38 - Tableau synthèse des éléments sismiques

3. Choix du type de mur

Au vu des recommandations de l'Eurocode 8 on adopte un système de murs de grandes dimensions et peu armés. Cela se justifie par la suite,

- Comprendre au moins deux murs ESP par direction ;
- Les voiles ESP portent collectivement 20% de la charge gravitaire totale au RDC.

Les ESP des files numériques reprennent 57% et ceux des files alphabétiques somment au total 30%. La validation du type de mur peut être consultée à l'Annexe.

4. Coefficient de comportement

A l'examen des vues en plan, des élévations et critères d'application de l'Eurocode 8, on peut conclure que la structure est régulière en plan et quasiment en élévation.

On se penche alors sur la détermination du coefficient de comportement du bâtiment. Ce coefficient vise à éviter un dimensionnement explicite dans le domaine non-linéaire. La capacité de dissipation d'énergie de la structure est prise en compte à travers d'une analyse élastique linéaire basée sur un spectre de réponse réduit, obtenu en introduisant le coefficient de comportement q .

Le coefficient de comportement q est une approximation du rapport entre les forces sismiques que la structure subirait si sa réponse était parfaitement élastique et amortie à 5%, et les forces sismiques qui peuvent être utilisées lors de la conception avec un modèle linéaire conventionnel.

Dans le contexte de ce projet, le bâtiment est considéré comme possédant un système à contreventement mixte. Cela signifie qu'il est constitué à la fois d'une ossature en portique aux façades et de murs porteurs à l'intérieur. Afin de déterminer si l'ensemble présente un comportement plus similaire à celui de l'ossature ou des murs, on mène une étude pour calculer le coefficient de comportement de chaque file porteuse,

<i>Système de murs non couplés, $q_0 = 3,0$</i>					
<i>Voiles</i>	h_w	l_w	α_0	k_w	q
1	33,44	24,75	1,35	0,78	2,35
2	3,9	15,7	0,25	0,50	1,50
2B	33,44	2	16,72	1,00	3,00
3	33,4	2	16,70	1,00	3,00
4	33,4	2	16,70	1,00	3,00
5	33,44	24,75	1,35	0,78	2,35
A*	33,44	12,9	2,59	1,00	3,00
A1	3,9	3,9	1,00	0,67	2,00
B	33,44	9	3,72	1,00	3,00
C	33,44	4	8,36	1,00	3,00
D*	33,44	12,9	2,59	1,00	3,00

On note que la majorité des valeurs de k_w sont égales à un, ce qui indique un comportement d'ossature. Cela se justifie par la hauteur du bâtiment qui est importante quand comparée avec les longueurs des voiles, sauf pour les files 2 et A1 qui s'ont interrompues au R+1. Alors en considérant l'ensemble des voiles on calcule $q = 3$.

Comme explicité précédemment, le bâtiment est considéré régulier en plan et plutôt irrégulier en élévation. On doit alors appliquer un coefficient de réduction de 0,8 à la valeur du coefficient de comportement. En effet, le non-respect des critères de régularité en élévation et notamment la non-continuité des éléments de contreventement depuis les fondations et jusqu'au sommet du bâtiment limite le comportement ductile du bâtiment. Ainsi l'application d'une minoration de 20% du coefficient de comportement est imposée par l'Eurocode 8.

Finalement on retient le coefficient de comportement $q = 2.4$ dont on peut déduire le spectre de référence affiché ci-dessous :

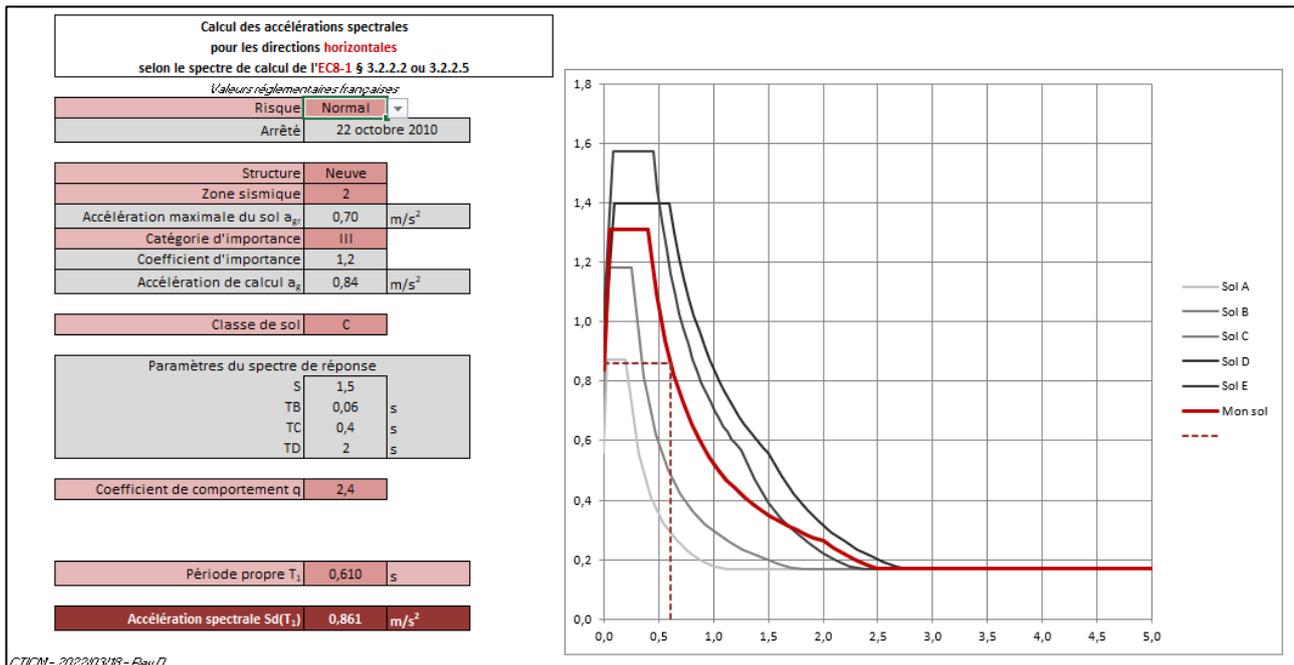


Figure 39 - Spectre de calcul selon l'Eurocode 8

5. Méthode des forces latérales

A l'aide d'une fiche Excel on retrouve les périodes fondamentales selon les directions principales du bâtiment,

$$T_{1x} = 0.86 \text{ s}; T_{1y} = 1.29 \text{ s}$$

Il est remarquable que les périodes calculées dépassent les valeurs de $2T_c$ (0.97 ; $1.35 > 2 \cdot 0.4 = 0.8$), ce qui signifie que l'utilisation de la méthode des forces latérales pour justifier l'étude sismique du bâtiment est proscrite.

Il convient de souligner aussi que les valeurs de période obtenues par la méthode des forces latérales sont plus élevées lorsqu'on les compare à l'estimation pratique. Pour cet immeuble de 10 étages (R+10), les bonnes pratiques estiment que la période fondamentale est aux alentours de 0.55 seconde.

Ainsi, recourir à cette méthode pour des périodes importantes peut entraîner un dimensionnement incorrect. Dans ce cas, il est possible que pour la période fondamentale on trouve une accélération spectrale moins élevée, située dans la branche descendante, tandis que pour la deuxième période, on peut avoir l'accélération spectrale maximale située au palier. Cette configuration peut entraîner un deuxième mode plus dimensionnant que le premier, renversant ainsi la logique de la conception parasismique.

Dans notre étude, la méthode des forces latérales sera principalement utilisée comme un outil pour obtenir une estimation approximative, mais elle ne sera pas employée pour le dimensionnement des éléments.

VI. Etude du projet à l'aide du logiciel Arche

A. Analyse Modale

Tout d'abord on va s'intéresser à l'analyse modale performée par Arche. Le tableau ci-dessous affiche les trois modes principaux qui représentent le comportement global de la structure.

Mode n°	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Amortissement
1	10.75	0.58	1.71	0.05
2	12.04	0.52	1.92	0.05
3	15.65	0.40	2.49	0.05

Figure 40 - Résultats des modes propres dimensionnants

Ensuite, il est nécessaire de s'assurer que l'analyse modale est représentative par la vérification de la quantité de masse mobilisées pour l'ensemble de modes calculés. Ci-dessous le tableau issu d'Arche :

Mode n°	Pulsation (Rad/s)	Période (s)	Fréquence (Hz)	Amortissement
30	0,14	0,00	-11,98	1,26
Résiduel	451,93	10,35	672,26	1,26
Total	4368,45	100,00		

Figure 41 – Bilan des masses mobilisées pour le séisme direction X

En calculant 30 modes on arrive à exciter 89,65% selon la direction ce qui est proche de la limite réglementaire. La vérification est simple, on en déduit par la participation du mode résiduel qui est à 10.35%, selon la direction Y c'est 5.35%. Pour pallier les 0.35% manquants, l'analyse modale doit être refaite en considérant davantage de modes. Toutefois au vu du temps d'attente pour l'analyse d'environ de 45 minutes et que la quantité de masse mobilisée est déjà assez proche de la valeur réglementaire, on valide l'analyse modale.

B. Répartition des efforts aux porteurs

Le bâtiment étant considérablement contreventé par des voiles on prend comme exemple la voile de la file B. Ce voile est l'un des éléments de contreventement plus sollicités au RDC car il appartient à l'ensemble des voiles du noyau qui sont continus de la fondation jusqu'au sommet du bâtiment. Le tableau suivant synthétise les efforts dans ce voile :

Voile File B - RDC			
Cas	N_x (t)	T_y (t)	M_z (t-m)
G	79	1	1
Q	13	0	0
S_x	-24	-2	-4
S_y	-12	-28	7
ELU	126	1	1
ELA_x	55	-10	-1
ELA_y	64	-28	6

Figure 42 - Tableau d'efforts internes au voile de la file B au RDC à l'issue de l'analyse sismique

C. Difficultés rencontrées

Comme évoqué précédemment, l'un des inconvénients plus importants sur Arche est mis en évidence lorsqu'on essaie de calculer le bâtiment par la méthode des éléments finis. Le générateur de maillage est peu performant et moins encore quant aux erreurs qui se produisent pendant l'étape de maillage des éléments.

Les informations d'erreur transmises à l'utilisateur sont typiquement vagues, on est obligé à effectuer un travail de compréhension d'un fichier *errorlog*. Un exemple est montré ci-dessous.

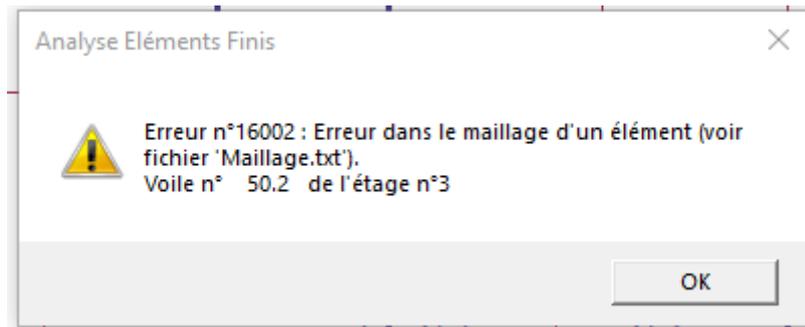


Figure 43 - Message d'erreur lors de l'analyse aux éléments finis

Le fichier auquel la fenêtre se réfère ne donne non plus davantage d'indice quant à la source de l'erreur. Durant les modélisations plusieurs types d'erreurs ont été retrouvés où différentes raisons ont été indiquées par le logiciel. Les plus récurrentes ont été :

- L'erreur n°16002 : Cet erreur concerne un problème lié au maillage d'un élément de surface. Parfois, le message d'erreur se repère à l'élément spécifique, comme illustré dans l'image ci-dessus, ce qui simplifie la recherche de solutions. Cependant, il peut arriver que cette erreur ne fournisse pas ce détail. Dans ce cas, il est impératif d'examiner le contenu du fichier 'Maillage.txt' afin d'identifier l'élément en question. Il est important de noter que les éléments répertoriés dans ce fichier ne sont pas directement identiques à leur représentation dans l'interface de modélisation d'Arche. Cette divergence peut engendrer une complexité supplémentaire lors de l'identification.

À titre d'exemple, pour l'erreur concernant le voile n° 50.2 du troisième étage, son identification dans le fichier se présente de la manière suivante :

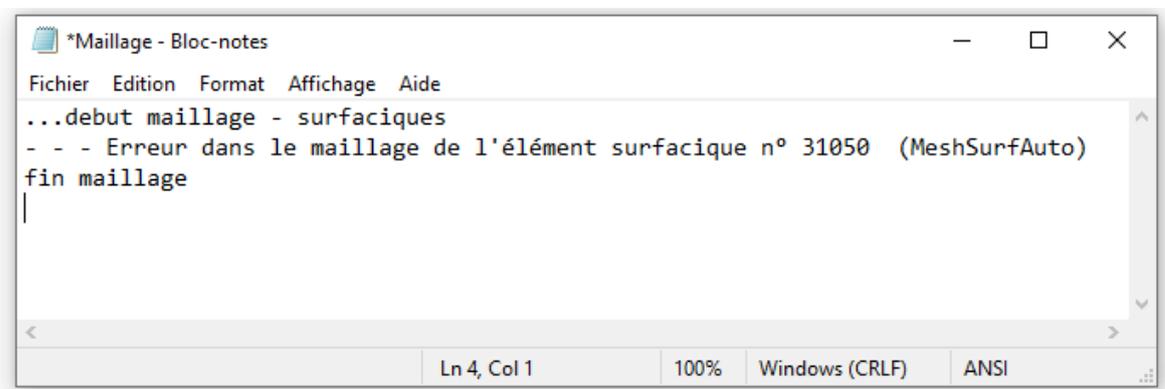


Figure 44 - Fichier de l'erreur 16002

- L'erreur 1003 : Cette erreur signale que le logiciel est incapable de continuer le processus de calcul du bâtiment en raison d'un problème de modélisation. Même si l'erreur est accompagnée du message "Erreur dans la construction du modèle", l'information fournie reste relativement générale. En effet, lorsqu'on utilise la méthode traditionnelle, applicable uniquement au calcul statique, l'analyse est menée à bien sans rencontrer des points de blocages. Ceci suggère que l'origine réelle de l'erreur réside probablement dans le maillage.

Pour résoudre ces problèmes, j'ai dû solliciter le support technique de Graitec. Les solutions proposées m'ont permis de parvenir à un maillage correct des éléments et à un modèle exploitable. Les ajustements recommandés par le support ont principalement concerné la configuration du logiciel plutôt que des erreurs de modélisation géométrique des éléments.

Afin d'obtenir un maillage correct des éléments pour l'analyse statique, j'ai apporté des modifications aux hypothèses de report de charges des éléments. Par exemple, pour les dalles, je les avais initialement modélisées comme des planchers diaphragmes. Pour faire aboutir le calcul, j'ai choisi l'option de détection automatique, où le logiciel détermine son comportement en fonction de la raideur dans la surface moyenne de l'élément.

Ensuite, il restait à vérifier l'absence de conflit entre les hypothèses spécifiques affectées à chaque élément et les configurations générales dans le menu *Méthode de calcul - DDC / Éléments finis*. Voici le paramétrage utilisé :

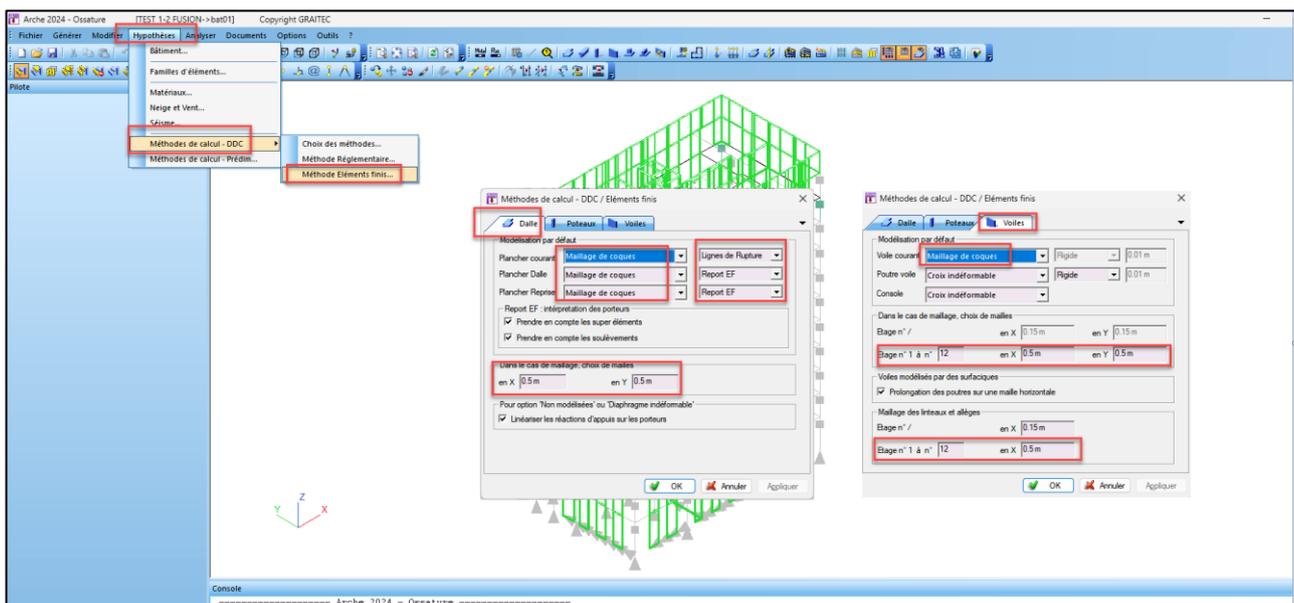


Figure 45 - Configuration de la méthode aux éléments finis sur Arche Ossature

Pour faire aboutir le calcul aux éléments finis lors d'une analyse sismique, il est essentiel de prêter attention spéciale aux configurations du logiciel. Lorsque le logiciel lance une analyse sismique, il prend en compte, par défaut, les charges climatiques telles que la neige et le vent. Cependant, il est important de noter qu'avec Arche, le générateur de charges de vent nécessite l'utilisation d'un élément de type *Parois* pour définir les surfaces d'application de la charge de vent. Par conséquent, si aucun élément de ce type n'est présent dans le modèle, le logiciel se bloque et affiche le message d'erreur suivant : « Erreur n° 0 : Une erreur s'est produite dans le déroulement de l'analyse aux éléments finis ». Il est à noter que, une fois de plus, le message d'erreur ne fournit pas d'explication sur la cause ou la solution.

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de désactiver les options de génération de neige et de vent dans le logiciel, comme illustré ci-dessous.

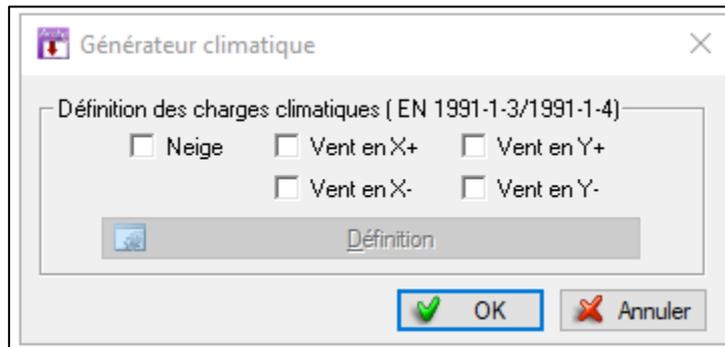


Figure 46 – Cases décochées de la boîte de dialogue du générateur de charges climatiques

Finalement après toutes ces étapes je n'avais plus d'erreurs et ai pu exploiter les résultats.

VII. Etude du projet à l'aide du logiciel Robot

A. Analyse modale

Les trois premiers modes de vibration représentatifs de l'analyse modale sur Robot ont leurs valeurs affichées dans le tableau ci-dessous.

Mode n°	Période (s)	Fréquence (Hz)
1	0,67	1,49
2	0,53	1,89
3	0,45	2,22

Figure 47 - Modes de vibration principaux issus de Robot

La vérification qualitative du comportement du bâtiment lors de sa mise en vibration est réalisée facilement par l'affichage des déplacements des nœuds dans l'outil *Diagramme* :

- Premier mode (Flexion transversale) :

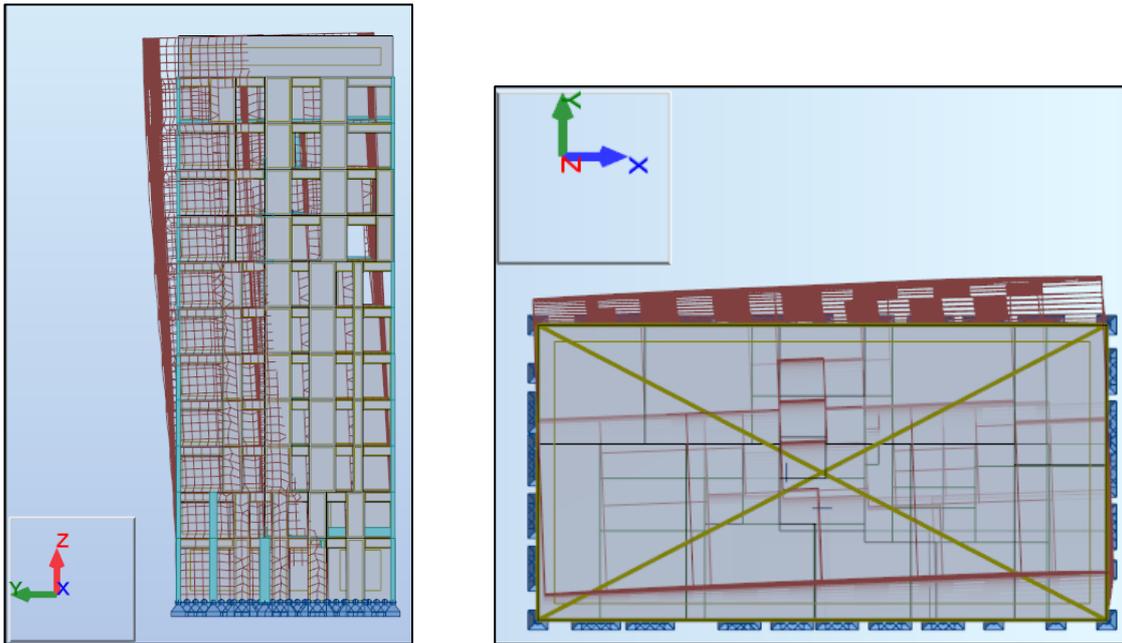


Figure 48 - Allure du premier mode de vibration

- Deuxième mode (Rotation de l'axe Z) :

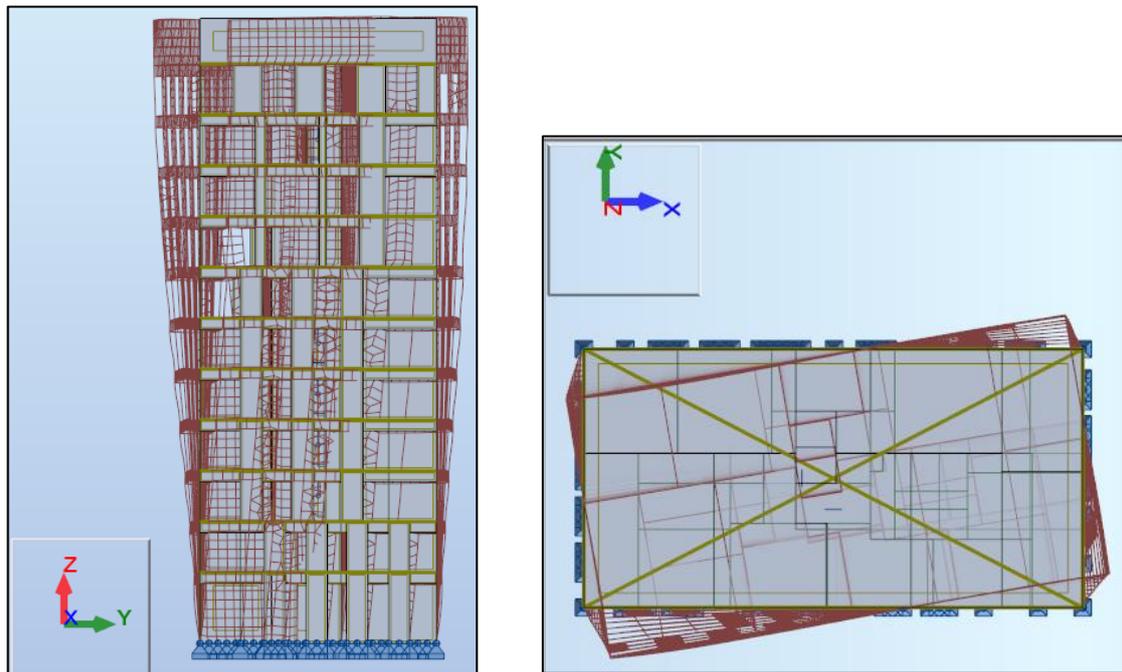


Figure 49 - Allure du deuxième mode de vibration

- Troisième mode (Flexion longitudinale) :

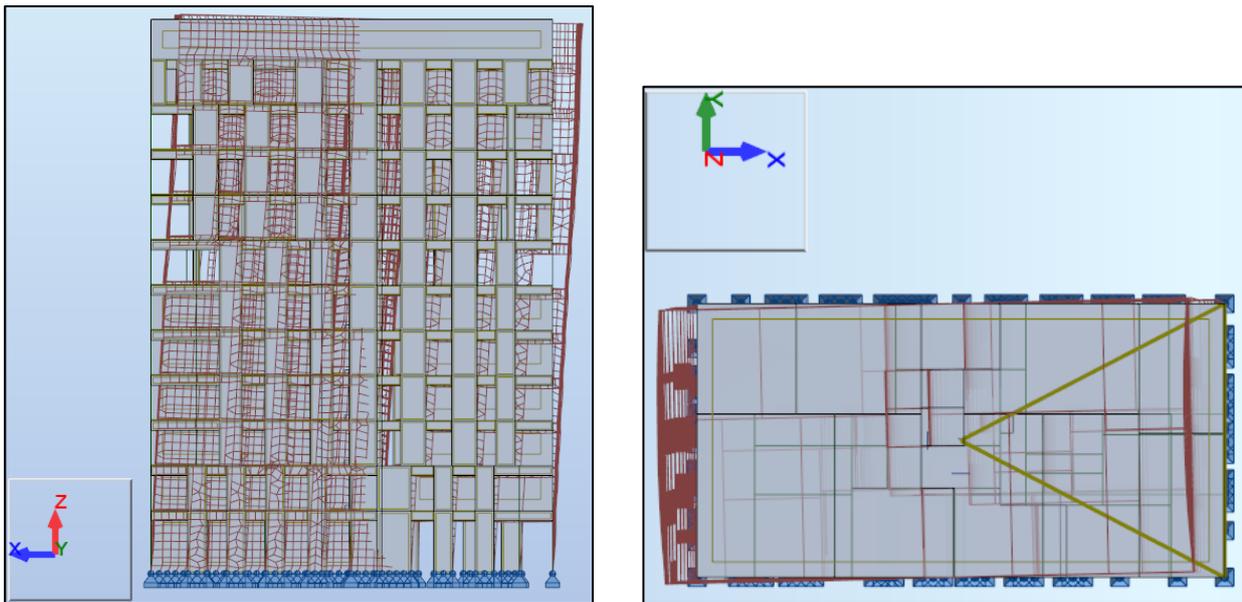


Figure 50 - Allure du troisième mode de vibration

Comme sur Arche, on procède à la vérification que le cumul des pourcentages de masses selon chaque direction dépasse les 90 %. Le logiciel indique que 89,69 % des masses du bâtiment sont mobilisées pour les modes calculés selon l'axe X et 90,65 % selon l'axe Y. Bien que l'on doive calculer davantage de modes, avec un écart aussi faible, on peut considérer que l'analyse est validée.

B. Répartition des efforts

La répartition des charges sur Robot s'avère moins intuitive que sur Arche. Pour aider l'utilisateur, l'outil de *Cartographie des panneaux* permet de visualiser les contraintes et les efforts membranaires.

Voici un exemple :

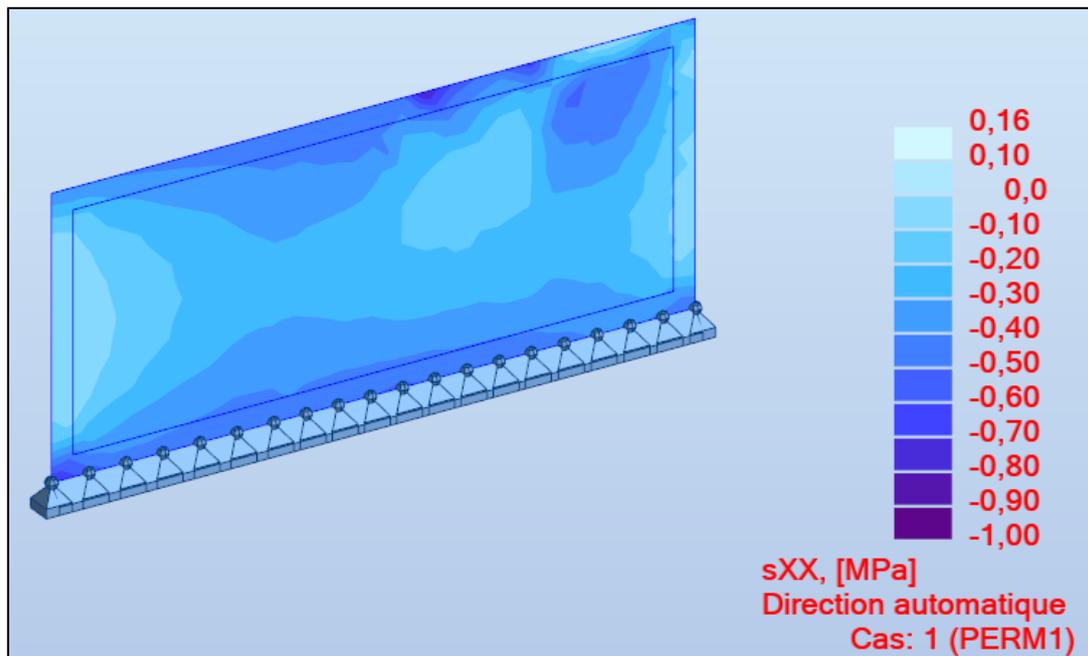


Figure 51 - Cartographie des contraintes normales d'un voile

L'exploitation des efforts à l'aide de l'outil *Cartographie* se révèle être une tâche difficile et peu précise. Cependant, Robot propose une solution avec l'outil *Efforts réduits pour les panneaux*, qui présente les résultats de manière plus compréhensible pour les ingénieurs structures.

En optant pour cet outil, le logiciel effectue plusieurs coupes dans la structure pour obtenir les efforts réduits sur chacun des plans de coupe générés. Ces efforts résultent en réalité de l'intégration numérique des contraintes observées dans l'analyse des résultats par cartographie.

Il est donc nécessaire de choisir judicieusement les plans de coupe qui sont pertinents pour le dimensionnement de l'élément. Par exemple, pour les voiles, on s'intéresse à vérifier les efforts normaux et de cisaillement au pied du voile. Pour ce faire, il suffit de sélectionner la case correspondant à la coupe horizontale inférieure, et le logiciel fournit alors les efforts demandés à cet endroit.

Ci-dessous l'opération de sélection du plan de coupe en pied de voile et les résultats triés :

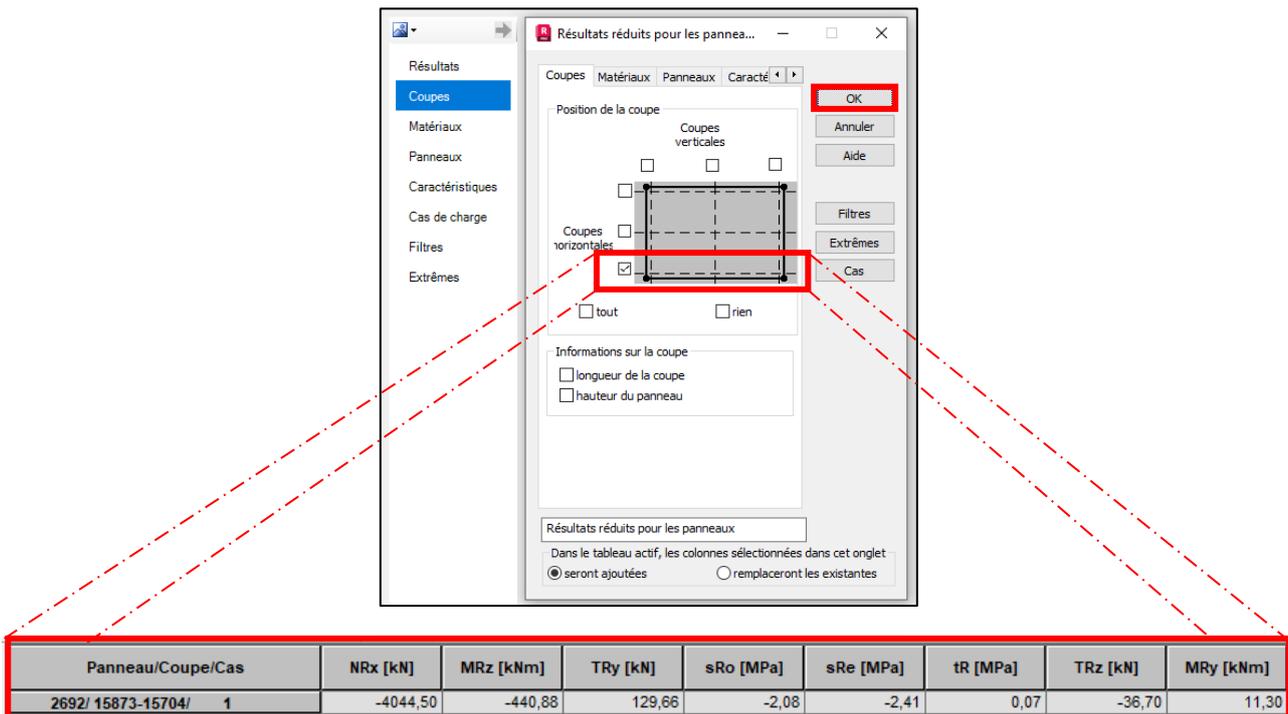


Figure 52 – Boîte de dialogue Résultats réduits pour les panneaux (en haut) et efforts réduits (en bas)

En revanche, l'outil de Cartographie sur Robot se montre intéressant pour analyser des effets locaux induits par le séisme, comme l'effet de poteau court. À ce stade du projet, nous n'avons pas encore étudié la présence des maçonneries qui pourraient brider les poteaux, mais cela reste à vérifier à la phase EXE.

La figure suivante illustre l'identification de ce phénomène dans un modèle EF :

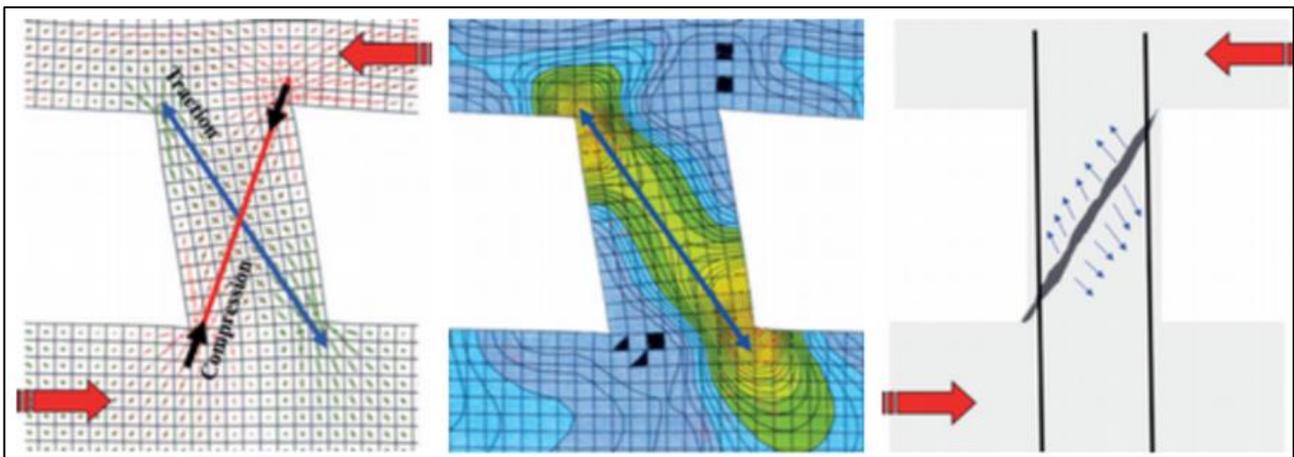


Figure 53 - Mécanisme de rupture des poteaux courts. Source : DAVIDOVICI. Conception-construction parasismique

C. Déplacements

Sur Robot on peut consulter les déplacements entre étages qui permettent de limiter les dommages du second œuvre du bâtiment. Pour notre projet, on se limite au cas d'un bâtiment ayant des éléments non

structuraux fixés de manière à ne pas interférer avec la structure. Ainsi, le tableau ci-dessous permet de justifier la maîtrise des dommages lors de la mise en vibration par le premier mode :

Étage	Hauteur étage (m)	Déplacement (cm)	Dépl. Rélatif (cm)	Dépl. Rélatif limite (cm)	Vérfié ?
10	2,9	2,5	0,1	7,25	Oui !
9	2,9	2,4	0,3	7,25	Oui !
8	2,9	2,1	0,2	7,25	Oui !
7	2,9	1,9	0,2	7,25	Oui !
6	2,9	1,7	0,5	7,25	Oui !
5	2,9	1,2	0,3	7,25	Oui !
4	2,9	0,9	0,3	7,25	Oui !
3	2,9	0,6	0,2	7,25	Oui !
2	2,9	0,4	0,1	7,25	Oui !
1	2,9	0,3	0,2	7,25	Oui !
RDC	3,9	0,1	0,1	9,75	Oui !

Figure 54 - Déplacements relatifs entre étages au séisme

D. Difficultés rencontrées

En règle générale, j'ai rencontré peu de difficultés lors de la modélisation dans Robot. Cela s'explique en partie par le fait que l'interface du logiciel est conçue de manière logique pour une utilisation aisée. De plus, Autodesk met à disposition sur Internet un site comportant une foire aux questions détaillée ainsi qu'un forum où les utilisateurs peuvent poser des questions concernant l'utilisation du logiciel. Ces deux ressources sont généralement suffisantes pour se débloquer lors de l'utilisation du logiciel.

L'une des difficultés que j'ai rencontrées au début était liée aux instabilités signalées par Robot lors du calcul d'un modèle comprenant des barres relâchées. J'ai appris que ces instabilités étaient dues à un relâchement excessif des éléments, ce qui engendrait des problèmes au niveau de la matrice de rigidité du logiciel. En conséquence, cela pouvait entraîner des déplacements irréalistes dans le modèle.

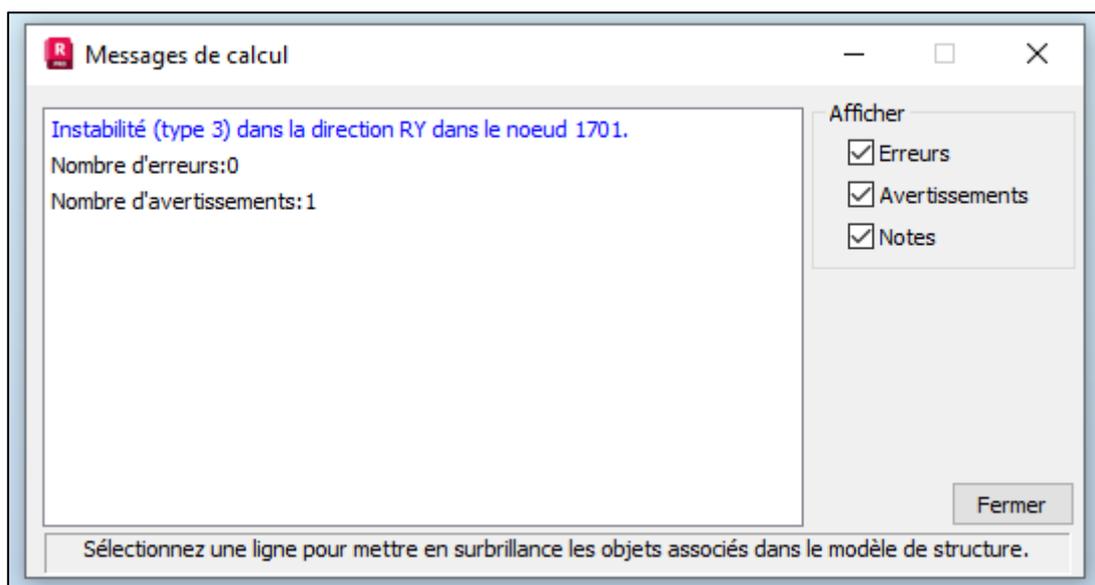


Figure 55 - Message d'avertissement d'une instabilité sur Robot

En ce qui concerne la phase de modélisation proprement dite, l'un des éléments cruciaux dans le modèle réalisé avec Robot était la représentation de la façade du bâtiment. Il était envisageable de l'aborder de trois manières distinctes :

- Trumeaux et linteaux en barre ;
- Trumeaux en élément surfacique type coque et linteaux en barre ;
- Trumeaux et linteaux en élément surfacique type coque.

Le choix de la troisième méthode de modélisation a été privilégié, car il était constaté que cette approche présentait une meilleure cohérence physique dans la distribution des contraintes, se rapprochant de la réalité une fois le bâtiment construit.

Le premier type de modélisation a été rapidement abandonné, étant donné que les trumeaux présentent une longueur significative, et les modéliser sous forme de barres aurait entraîné une perte de précision dans le modèle.

Finalement, le modèle mixte n'a pas été retenu, car il introduisait de nombreuses zones de concentration de contraintes qui altéraient le comportement physique attendu. De plus, l'interaction entre les éléments barres et surfaciques nécessite une approche méticuleuse en raison d'une différence de degrés de liberté. En effet, les éléments coques de Robot utilisent des fonctions de déformation du premier degré, tandis que les éléments finis de type barre ont des fonctions de déformation du deuxième degré. Ainsi, pour ancrer une poutre de type barre dans un voile du type coque, il est nécessaire que la barre soit en interaction avec plus de deux éléments finis coques de chaque côté.

VIII. Bilan comparatif

A. Analyse modale

En ce qui concerne les fréquences propres de vibration, les deux logiciels affichent des valeurs assez similaires. Avec une variation marginale de 10 %, il est raisonnable de conclure que, sur cet aspect, il n'y a pas de préférence évidente pour l'un par rapport à l'autre.

Mode n°	Type	Arche - Période (s)	Robot - Période (s)	Différence
1	Flexion transversale	0,58	0,67	13%
2	Rotation axe Z	0,52	0,53	2%
3	Flexion longitudinale	0,4	0,45	11%

Figure 56 - Comparaison entre les valeurs des modes de vibration

La visualisation des modes de vibration dans Robot est relativement simple, ce qui permet une vérification qualitative rapide de l'analyse modale.

D'autre part, Arche offre également la possibilité de visualiser les modes, mais cela nécessite l'utilisation du logiciel Effel. Bien que les étapes pour obtenir les représentations visuelles puissent être légèrement plus longues que sur son concurrent, elles ne présentent pas de difficultés majeures.

Cependant, il est important de noter que les temps de calcul diffèrent considérablement entre les deux logiciels. En moyenne, le calcul pour ce bâtiment prenait environ 10 minutes sur Robot, tandis qu'avec Arche, il fallait patienter pendant environ 45 minutes. Cette différence significative dans les temps de calcul ne peut être négligée. En effet, le temps joue un rôle crucial dans l'estimation des honoraires des ingénieurs structures, car en le sous-estimant, la rentabilité du projet pourrait être compromise.

B. Exploitation des résultats

Concernant l'exploitation des résultats, on note que le logiciel Arche s'avère plus performant que Robot. Cette préférence est mise en évidence lorsqu'on fait des vérifications aux éléments après les calculs. Arche Ossature permet de consulter les charges agissantes au niveau des porteurs de façon simple, soit en utilisant la méthode traditionnelle soit la méthode aux éléments finis.

De plus, les modules ferrailages constituent le point le plus fort d'Arche une fois qu'on peut exporter directement les efforts issus du calcul vers un outil de ferrailage. Dans le module ferrailage il est possible de réaliser vérifications méticuleuses aux éléments bien comme paramétrer de façon simple les dispositions des aciers afin d'avoir un rendu plus propre.

En ce qui concerne Robot, il est observé que bien que le logiciel soit capable de réaliser les calculs pour les structures en béton armé, ses fonctionnalités pour le dimensionnement des armatures des éléments ne sont pas particulièrement adaptées. Son module de ferrailage se révèle plus complexe et peu intuitif.

Par conséquent, dans le cas où Robot est le seul outil disponible pour le dimensionnement d'un élément en béton armé, la meilleure approche consiste à récupérer les efforts du logiciel et à utiliser des feuilles Excel pour effectuer les vérifications nécessaires.

Au cours de l'analyse des résultats, j'ai été confronté à des valeurs de descente de charges différentes dans les modèles statique et dynamique sur Arche, ainsi que dans le modèle dynamique sur Robot.

Le modèle statique sur Arche était caractérisé par une configuration minutieuse des paramètres. Tous les porteurs avaient été définis avec des comportements spécifiques. Par exemple, les voiles ont été

manuellement identifiés comme voiles courants ou comme poutres-voiles, en fonction de leur comportement dans la structure.

Cependant, dans le modèle dynamique, à force de faire aboutir les calculs EF, tous les paramètres de comportement ont été passés en détection automatique. Cette modification pourrait être à l'origine de la différence observée dans la descente des charges entre ces deux modèles.

En ce qui concerne la modélisation dans Robot, une différence notable a eu un impact significatif sur la descente des charges. Les dalles ont été modélisées comme des diaphragmes rigides sans découpage entre les éléments porteurs. Sur le contexte du comportement sismique, cette différence n'est pas considérable. Cependant, la répartition des charges entre les éléments porteurs ne présente pas de similarité avec les modèles réalisés dans Arche.

De plus, dans la version 2023 de Robot, il n'est pas possible de choisir le mode de répartition des charges pour un élément surfacique tel qu'une dalle. L'utilisateur ne dispose donc pas de l'option permettant de définir le report de charges entre une ou deux directions. Ainsi, même en réalisant un bon découpage des dalles dans Robot, des divergences subsisteraient lorsqu'on le confronte avec un modèle de dalles unidirectionnelles modélisé dans Arche, comme c'est le cas dans notre étude.

Par conséquent, la décision la plus judicieuse, dans ce cas, serait d'utiliser les résultats de l'analyse statique effectuée dans Arche pour la répartition des charges permanentes et l'exploitation des charges, tandis que les efforts sismiques provenant du modèle dynamique d'Arche seraient exploités pour bénéficier du module de ferrailage performant.

C. Bilan final

On regroupe dans le tableau suivant un ensemble de critères qui permettent de mettre en évidence les points forts et faibles de chaque logiciel :

Critères	Arche Ossature	Robot Structural Analysis
Polyvalence		+
Modélisation	+	
Contrôle du modèle	+	
Facilité de correction d'un modèle		+
Temps de calcul		+
Exploitation des résultats	+	

Figure 57 - Tableau synthèse des points forts de chaque logiciel

Chaque critère est expliqué de la manière suivante :

- *Polyvalence* : Capacité du logiciel à effectuer des calculs de structures avec différents types de matériaux ;
- *Modélisation* : Facilité de manipulation du logiciel lors de la saisie des éléments du modèle.
- *Contrôle du modèle* : Disponibilité et la facilité d'utilisation des outils permettant de vérifier si les hypothèses prises par le logiciel correspondent à celles établies dans la conception de la structure.

- *Facilité de modifications du modèle* : Simplicité de navigation dans le modèle et la facilité avec laquelle des ajustements peuvent être apportés après une première analyse.
- *Temps de calcul* : Mesure la durée nécessaire pour effectuer les analyses à l'aide du logiciel.
- *Exploitation des résultats* : Facilité de compréhension des informations fournies par le logiciel ainsi que la disponibilité d'outils pour le dimensionnement des éléments en béton armé.

IX. Conclusion

Mon stage au sein de Make Ingénierie a représenté une opportunité unique pour moi de me lancer dans une carrière que j'avais songé épouser depuis longtemps. La multitude de défis auxquels nous faisons face au quotidien et le besoin constant de trouver des solutions adaptées sont des éléments qui m'ont incité à choisir cette voie professionnelle de manière résolue.

Ce séjour au sein de l'entreprise a constitué un pilier fondamental dans mon parcours d'ingénieur. Chacune des missions qui m'ont été confiées a contribué à renforcer mes compétences dans le domaine des structures. Ces expériences ont mis en pratique les connaissances que j'ai acquises à l'ESTP ainsi que lors de ma formation antérieure au Brésil, ce qui m'a donné la certitude d'avoir fait le bon choix de parcours dans l'école d'ingénierie.

L'interaction avec divers acteurs de l'industrie de la construction a été l'un des aspects marquants de mon stage. La dimension sociale de l'échange avec d'autres professionnels m'a permis de comprendre l'ampleur du secteur de la construction et de réaliser l'impact concret de chaque décision prise en tant qu'ingénieur structures derrière un ordinateur.

Le projet Lille Metropolitan Square a été une expérience profondément enrichissante remplie de défis. J'ai investi de nombreuses heures dans la recherche des meilleures solutions, et encore davantage dans la réalisation des modélisations nécessaires. Les cours dispensés dans l'option Structure à l'école ont renforcé la motivation initiale que j'avais pour ce projet.

Ce stage a largement contribué à cultiver mon appréciation pour ce métier qui nous pousse constamment à apprendre et à découvrir de nouveaux processus. En fin de compte, j'ai acquis une vision plus profonde et nuancée du rôle de l'ingénieur structures dans le domaine du génie civil, et je suis désormais prêt à embrasser les défis à venir avec confiance et enthousiasme.

My internship at Make Ingénierie has been a unique opportunity for me to embark on a career which I had contemplated for a long time. The multitude of challenges we face daily and the constant need to find tailored solutions are factors that have strongly motivated me to choose this professional journey.

The company has been a fundamental pillar in my engineering trajectory. Each of the assigned tasks has contributed to enhancing my skills in the field of structural engineering. These experiences have brought to life the knowledge I gained at ESTP as well as during my previous education in Brazil, solidifying my belief in having made the right choice in pursuing engineering studies.

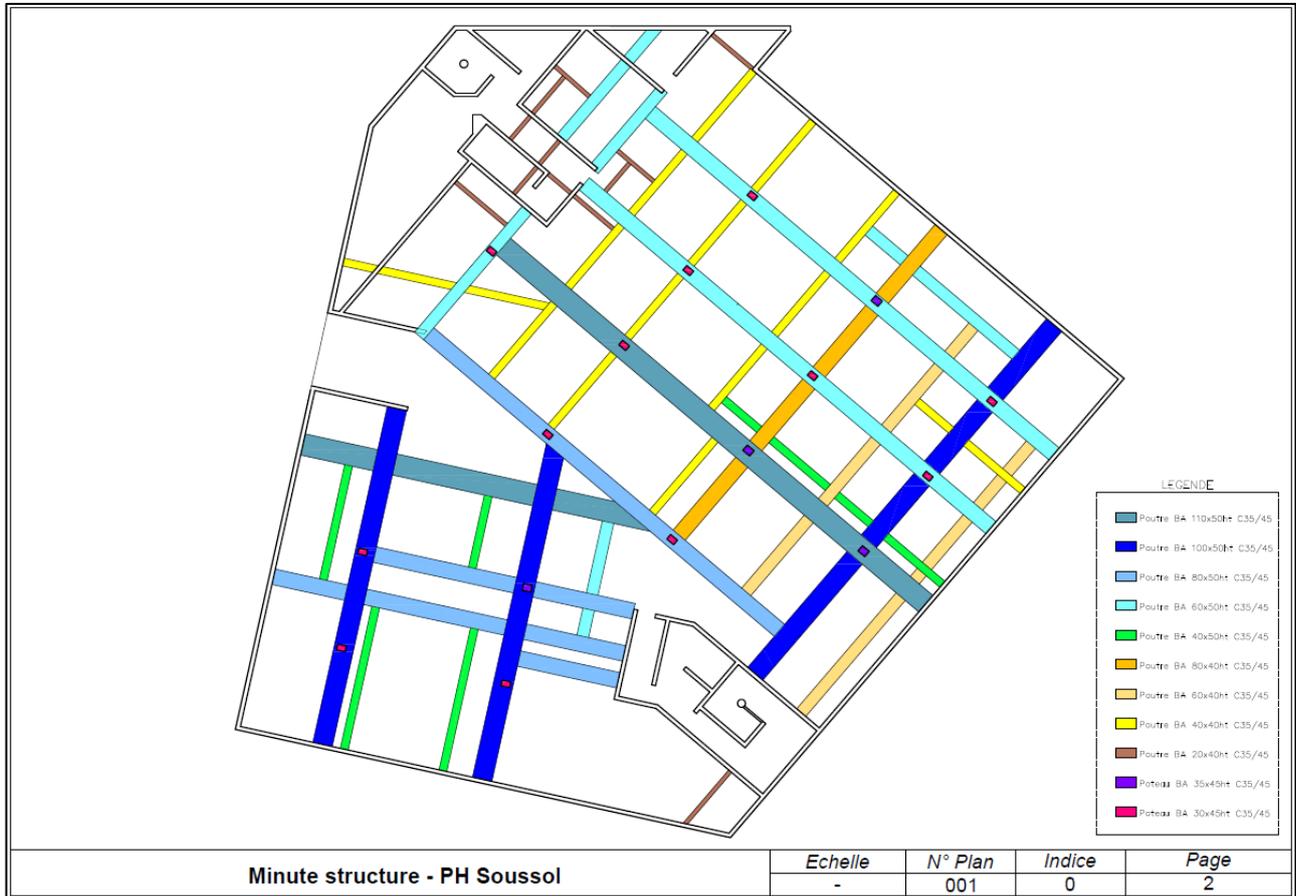
Engaging with various stakeholders in the construction industry has been one of the aspects of my internship that stands out the most. The social dimension of interacting with fellow professionals has provided insights into the vastness of the construction sector and illuminated the impact of every decision made as a structural engineer working behind a computer.

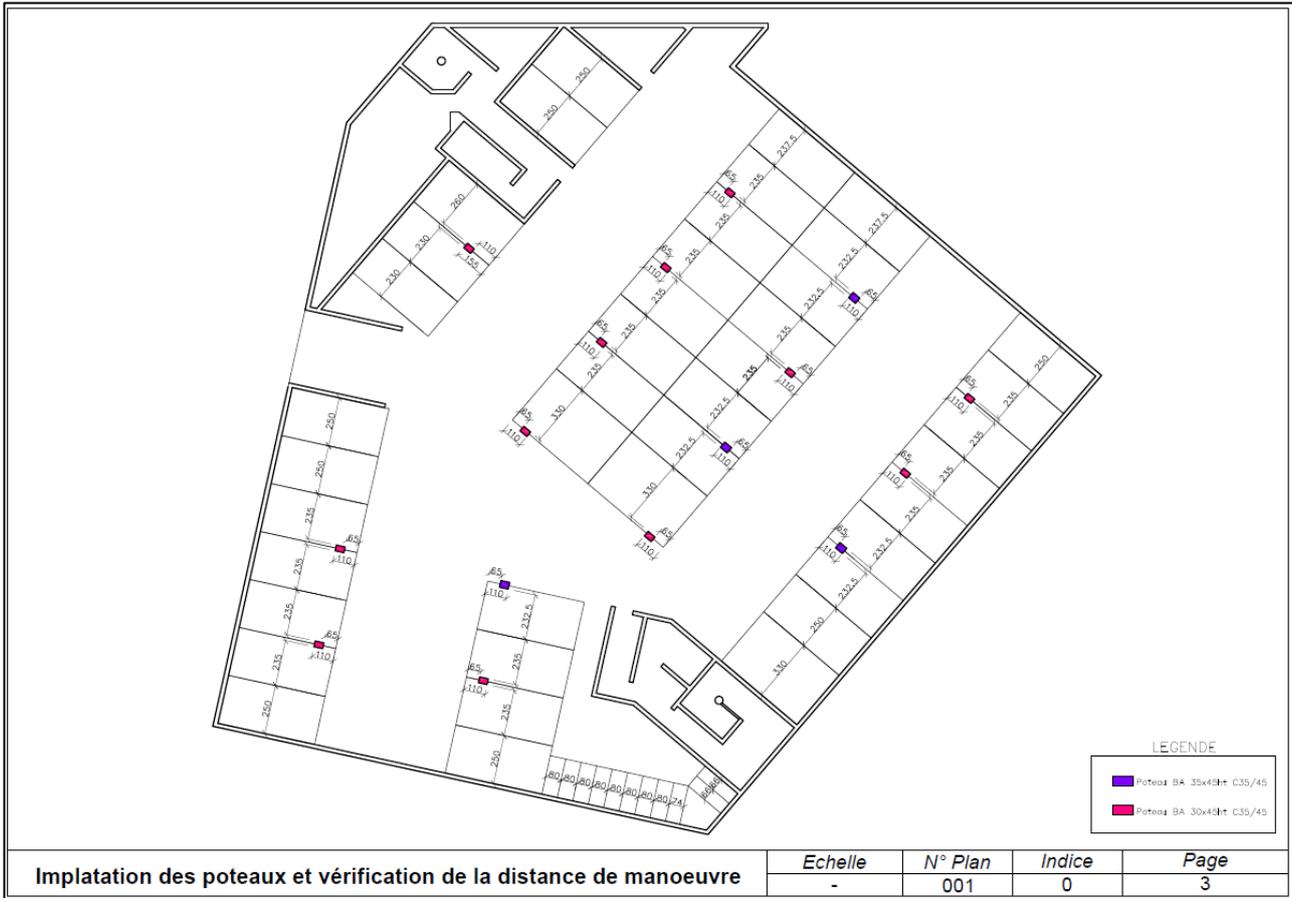
The Lille Metropolitan Square project was a profoundly enriching experience marked by challenges. I dedicated numerous hours to exploring optimal solutions and even more in executing the necessary modelling work. My motivation for this project is deeply rooted in the courses offered within the Structural option at the school. This internship has significantly deepened my appreciation for a profession that constantly urges us to learn and discover new processes. In the end, I have gained a more profound and nuanced understanding of the role of a structural engineer in the civil engineering domain, and I am now poised to embrace forthcoming challenges with confidence and enthusiasm.

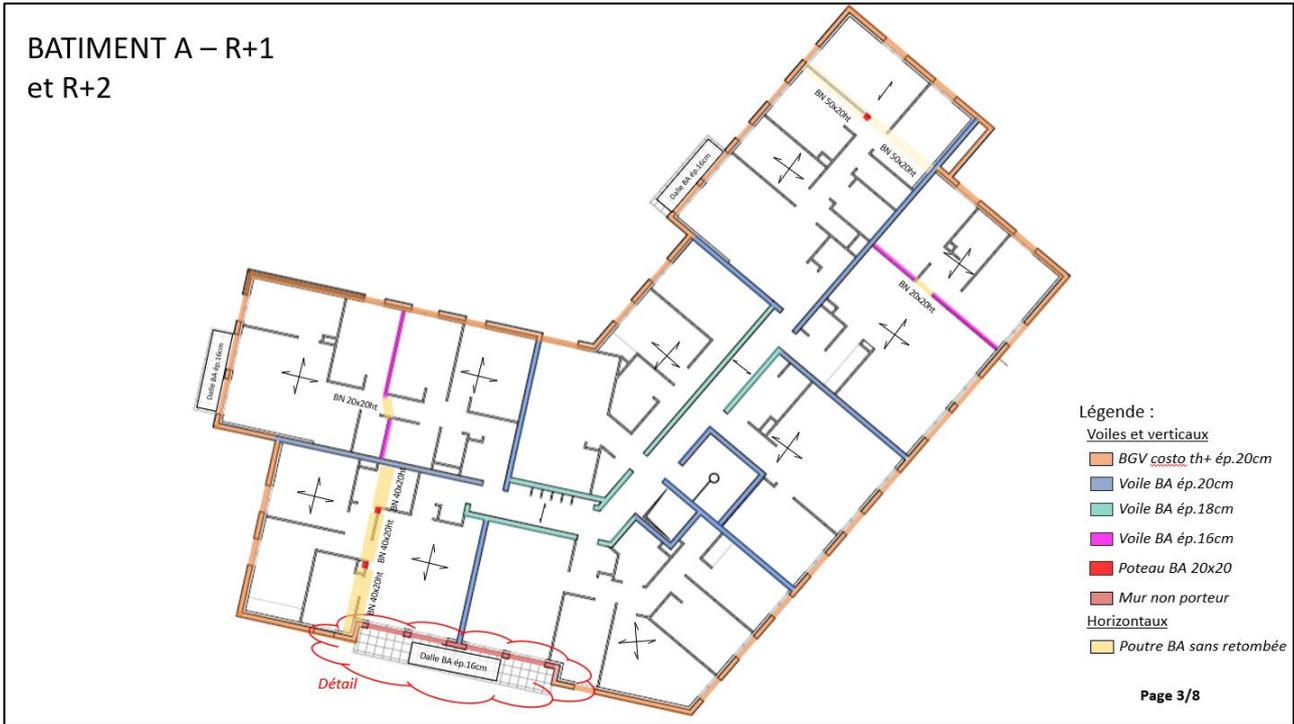
X. Annexes

A. Projet MLC :

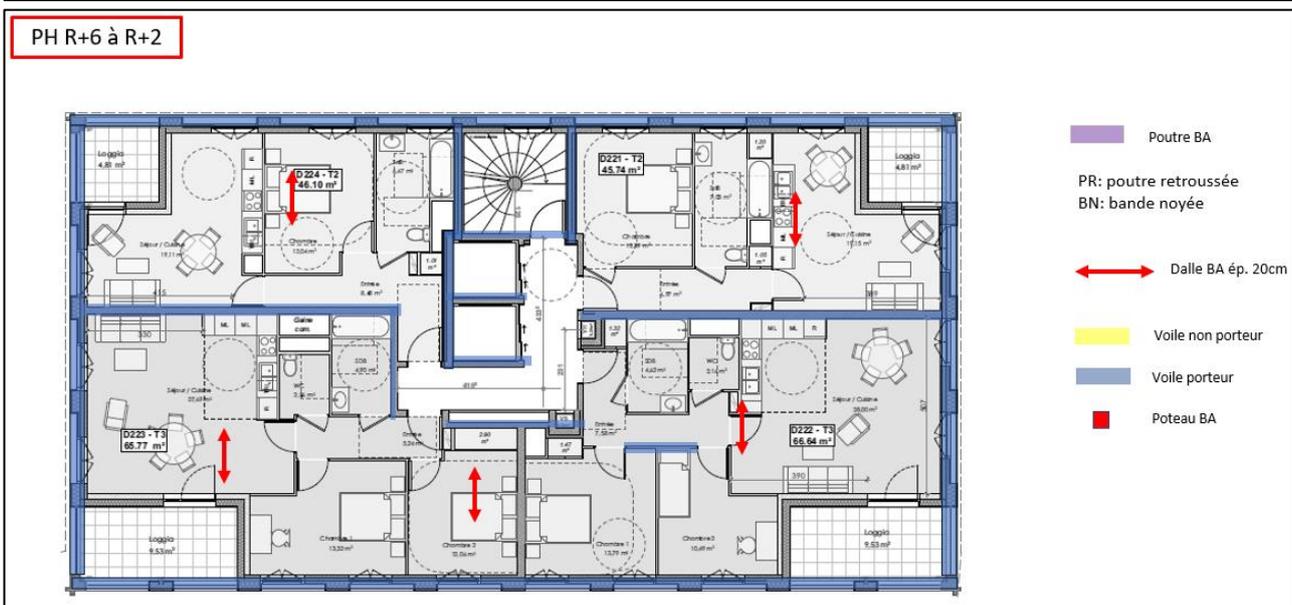
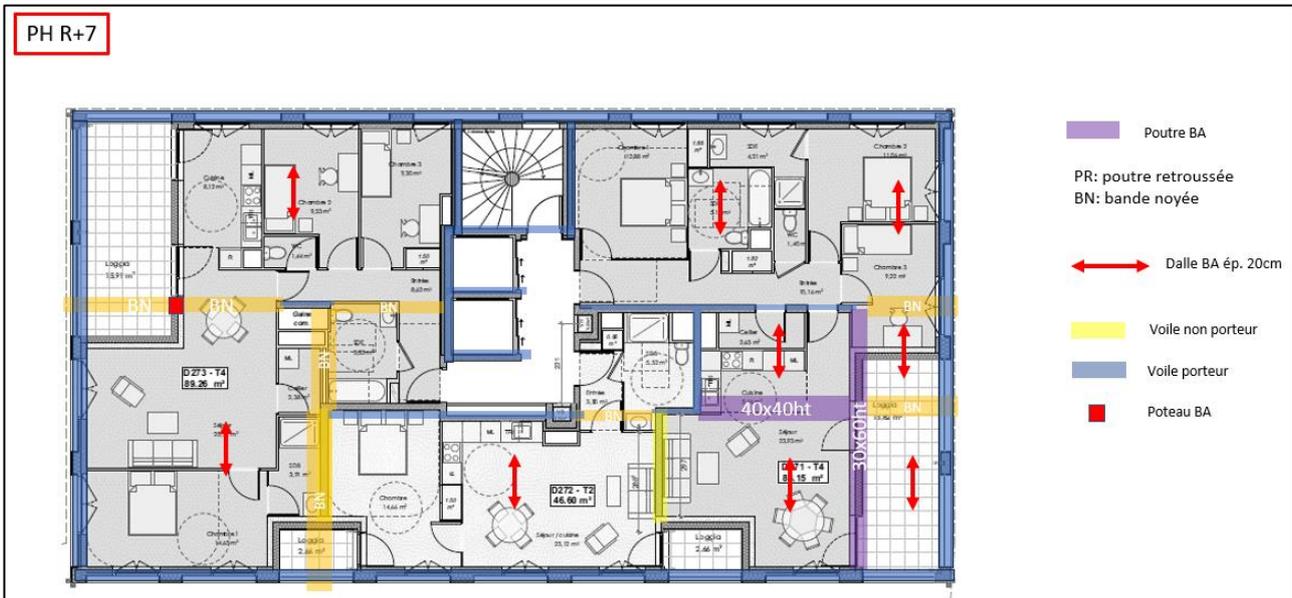
1. Minutes structures

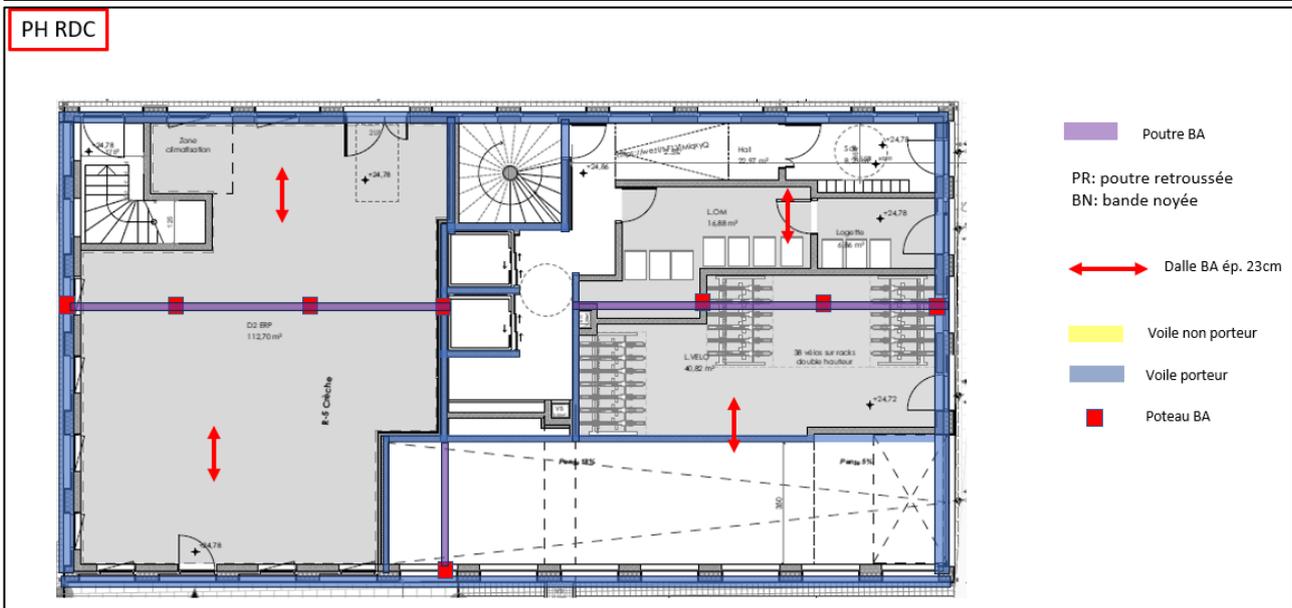
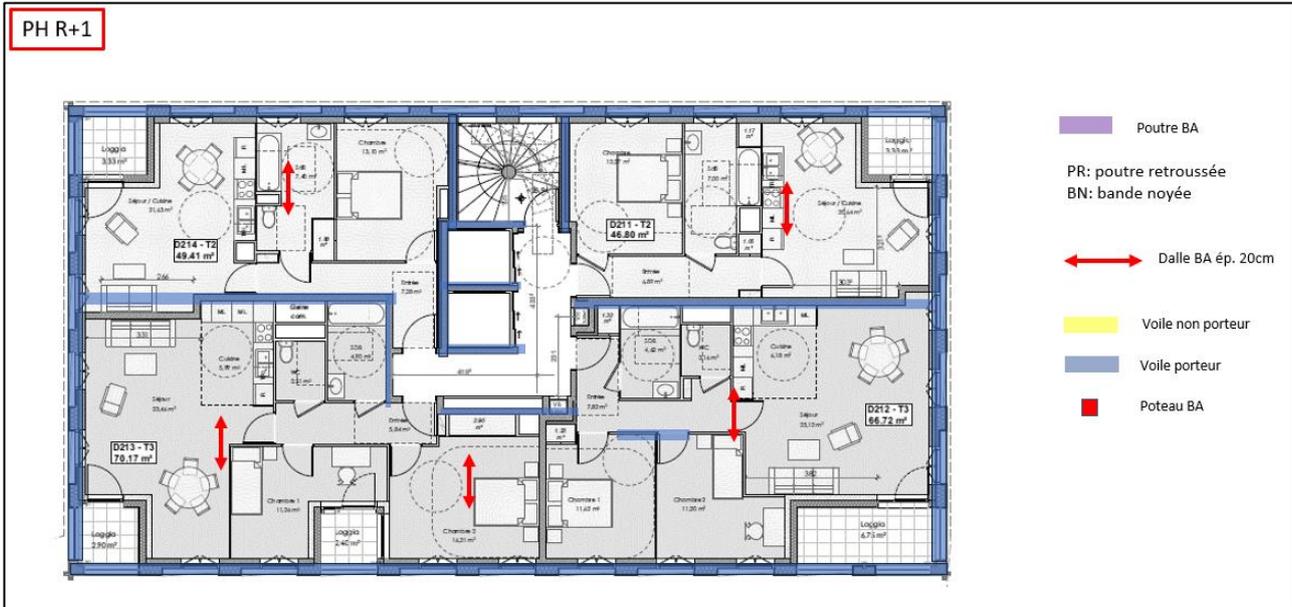












2. Tableaux de calcul du centre de torsion

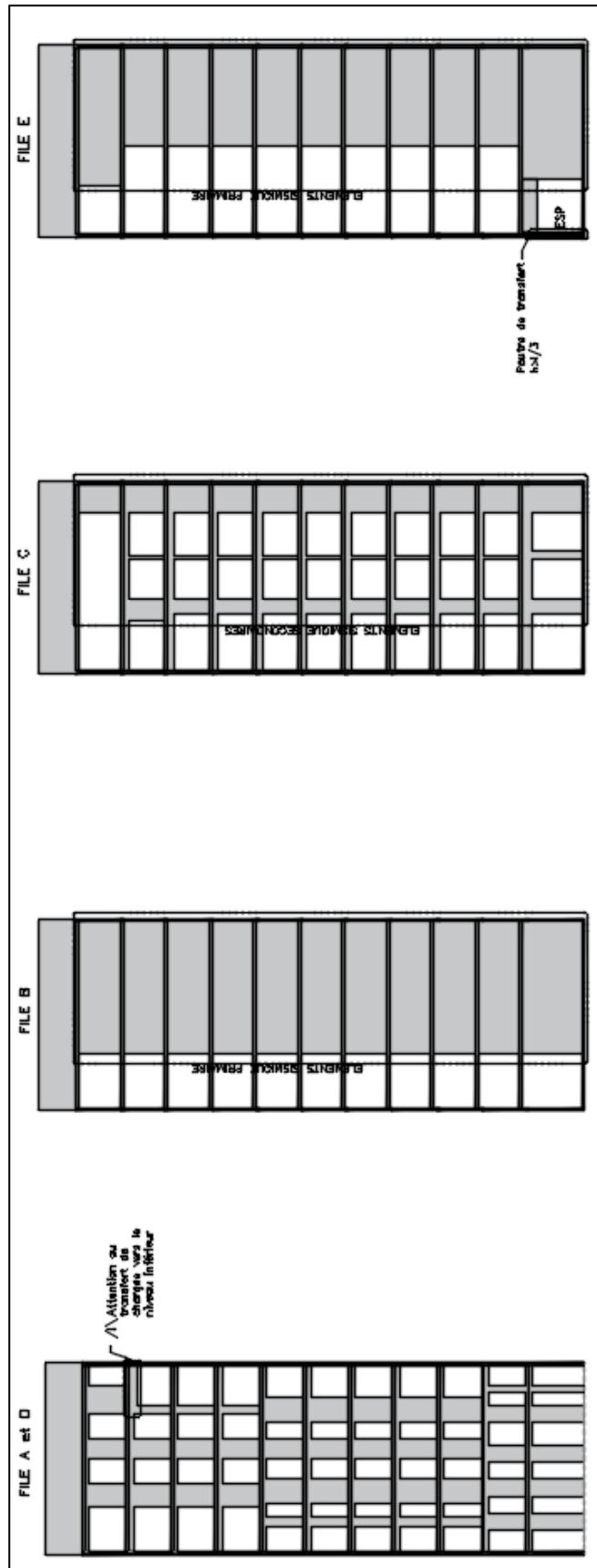
File	Numéro Refend	$I_{voile,i}$ (m)	$e_{voile,i}$ (m)	I_{xi} (m ⁴)	y'_i (m)	$I_{x'i}$ (m ⁵)	$(y_i - y_c)^2 I_{xi}$
X	1*	24,75	0,2	49,30	0,10	4,93	1425,96
	2	15,7	0,2	64,50	3,90	251,54	160,61
	2B	2	0,2	0,13	6,20	0,83	0,07
	3	2	0,2	0,13	8,00	1,07	0,85
	4	2	0,2	0,13	9,80	1,31	2,49
	5*	24,75	0,2	49,30	12,90	635,99	2715,83
	Σ			163,50		895,67	4305,81
	y_T :	5,48 m					
	r_x :	7,51 m					
Files	Numéro Refend	$I_{voile,i}$ (m)	$e_{voile,i}$ (m)	I_{xi} (m ⁴)	x'_i (m)	$I_{x'i}$ (m ⁵)	$(x_i - x_c)^2 I_{xi}$
Y	A*	12,9	0,2	15,34	0,10	1,53	2230,26
	A1	3,9	0,2	0,99	9,00	8,90	9,86
	B	9	0,2	12,15	10,50	127,58	33,40
	C	4	0,2	1,07	24,85	26,51	171,83
	D*	12,9	0,2	15,34	24,85	381,19	2471,02
	Σ			44,88		545,70	4916,37
	x_T :	12,16 m					
	r_y :	14,33 m					

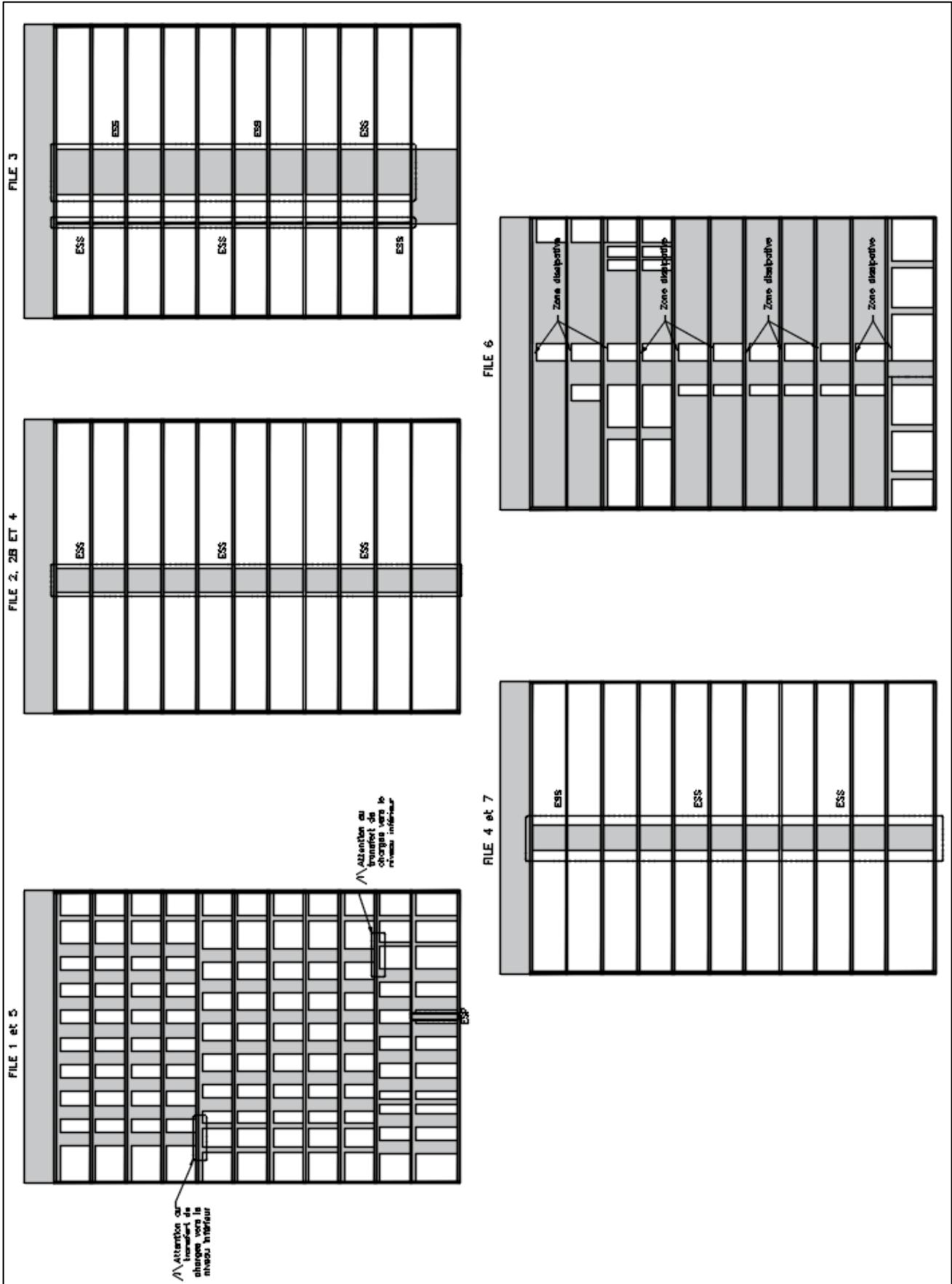
3. Analyse des efforts unitaires aux voiles au RDC

	Refend	$I_{y_i} (m^4)$	$y'_i (m)$	$y^*_i (m)$	$I_{y^*_i} (m^6)$	$F_{i,trans}$	$F_{i,rot}$	F_i
X	1*	49,30	0,10	-5,38	1425,96	0,30	-0,06	0,24
	2	64,50	3,90	-1,58	160,61	0,39	-0,02	0,37
	2B	0,13	6,20	0,72	0,07	0,00	0,00	0,00
	3	0,13	8,00	2,52	0,85	0,00	0,00	0,00
	4	0,13	9,80	4,32	2,49	0,00	0,00	0,00
	5*	49,30	12,90	7,42	2715,83	0,30	0,08	0,38
	Σ	163,50			4305,81	1,00	0,00	1,00

	Refend	$I_{x_i} (m^4)$	$x'_i (m)$	$x^*_i (m)$	$I_{x^*_i} (m^6)$	$F_{i,trans}$	$F_{i,rot}$	F_i
Y	A*	15,34	0,10	-12,06	2230,26	0,34	-0,01	0,33
	A1	0,99	9,00	-3,16	9,86	0,02	0,00	0,02
	B	12,15	10,50	-1,66	33,40	0,27	0,00	0,27
	C	1,07	24,85	12,69	171,83	0,02	0,00	0,02
	D*	15,34	24,85	12,69	2471,02	0,34	0,01	0,35
	Σ	44,88			4916,37	1,00	0,00	1,00

4. Élévations des éléments sismiques





5. Justification des murs conventionnels

<i>Files numériques</i>			<i>Files alphabétiques</i>		
<i>Files</i>	<i>Elém. Sismique</i>	<i>Pourcentage</i>	<i>Files</i>	<i>Elém. Sismique</i>	<i>Pourcentage</i>
1	ESP	15%	A	ESP	10%
2	ESP	12%	A1	ESS	3%
2B	ESS	3%	B	ESP	11%
3	ESP	17%	C	ESS	5%
4	ESS	3%	D	ESP	9%
5	ESP	12%	Total ESP :		30%
		Total ESP :			
		57%			

XI. Bibliographie

DAVIDOVICI, Victor. **Conception-construction parasismique**. Librairie Eyrolles, 2016. 944 p. Collection Eurocode ;

THONIER, Henry. **Conception et calcul des structures de bâtiment**. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 1999. 326 p. Collection Conception et calcul des structures de bâtiment

DAVIDOVICI, Victor ; CORVEZ, Dominique. **Pratique du calcul parasismique**. Librairie Eyrolles, 2014. 244 p. Collection Eurocode ;

LESTUZZI, Pierino ; BADOUX, Marc. **Génie parasismique**. EPFL Press, 2023. 344 p. Collection complément au Traité de Génie Civil ;

NATTERER Julius ; HERZOG Thomas et al ; **Construire en bois**, 2005. 376 p. Collection Atlas de la Construction ;

XII. Liste des figures

Figure 1 – Organigramme de l'entreprise	10
Figure 2 - Cycle global de l'exploitation et de l'utilisation du bois.....	12
Figure 3 - Classement des bureaux d'études structure engagés pour une architecture bas carbone. Source : Séquence bois n° 136	13
Figure 4 - Maquette architecturale renderisée (en haut) et Maquette structure (en bas)	15
Figure 5 – Minute de dimensionnement du projet MLC : Bâtiment A (en haut) et Bâtiment B (en bas).....	17
Figure 6 - Visualisation 3D de la structure modélisée sur Arche Ossature	18
Figure 7 - Conflits de passage de conduit au sous-sol	18
Figure 8 - Ferrailage de la poutre percée près de l'appui - Arche Ossature	19
Figure 9 – Elévation architecturale du projet RDN (en haut) et modèle Revit de la structure de surélévation (en bas).....	20
Figure 10 - Comparaison des poids volumiques du bois et du béton.....	22
Figure 11 - Différences entre une surélévation en bois et béton - Charges gravitaires	22
Figure 12 - Différences entre une surélévation en bois et béton - Charges sismiques	23
Figure 13 - Modèle de la structure de surélévation sur Robot Structural Analysis	24
Figure 14 – Assemblage entre l'entrait, le poinçon et les diagonales d'une ferme sur Logiciel Master EC 5	25
Figure 15 - Plan de repérage des assemblages pour une ferme (en haut) et détail de l'assemblage A3 (en bas)	25
Figure 16 - Risque sismique = Aléa U Vulnérabilité	28
Figure 17 - Zonage sismique en vigueur depuis 2011.....	29
Figure 18 - Modes de vibration d'un bâtiment : Global de translation (à gauche et au centre) et local de flexion des planchers (à droite)	31
Figure 19 - Logigramme d'une modélisation sur Arche Ossature.....	32
Figure 20 - Exemple de la modélisation des éléments porteurs d'un étage en 2D (en haut) et la perspective du bâtiment en 3D (en bas).....	33
Figure 21 - Ruban Mode d'accrochage.....	34
Figure 22 - Configuration probables d'intersection de poutres.....	35
Figure 23 - Affichage de la répartition de charge d'une dalle à l'aide de l'outil Report de charge	35
Figure 24 - Affichage de la transition des charges d'un réseau de poutres	36
Figure 25 - Hypothèses de calcul d'analyse sismique sur Arche Ossature.....	37
Figure 26 - Ruban Structure sur Robot et le menu Caractéristiques additionnelles	38
Figure 27 - Sélection de voiles filtrés par leur épaisseur	39
Figure 28 – Exemple des maillages : Delaunay (à gauche) et Coons (à droite).....	40
Figure 29 - Déclaration de l'analyse modale sur Robot	41
Figure 30 - Efforts membranaires d'un bloc de voiles d'un noyau avant la signature des modes (à gauche) et après la signature (à droite)	42
Figure 31 - Plan de masse Lot D Lille Metropolitan Square	44
Figure 32 - Ondulation sur la façade du bâtiment D2.....	45
Figure 33 - Perspective du lot D depuis la rue. Bâtiment D2 au centre	45
Figure 34 - Localisation du projet sur la carte de zonage sismique	46
Figure 35 - Plan des éléments porteurs au RDC.....	47
Figure 36 - Centre de gravité (en vert) et de torsion (en jaune) au RDC	48
Figure 37 - Plan de repérage des éléments sismiques principaux (en noir) et secondaires (en gris).....	49
Figure 39 - Tableau synthèse des éléments sismiques	49
Figure 40 - Spectre de calcul selon l'Eurocode 8.....	51

Figure 41 - Résultats des modes propres dimensionnants	52
Figure 42 – Bilan des masses mobilisées pour le séisme direction X.....	52
Figure 43 - Tableau d'efforts internes au voile de la file B au RDC à l'issue de l'analyse sismique	52
Figure 44 - Message d'erreur lors de l'analyse aux éléments finis	53
Figure 45 - Fichier de l'erreur 16002.....	53
Figure 46 - Configuration de la méthode aux éléments finis sur Arche Ossature	54
Figure 47 – Cases décochées de la boîte de dialogue du générateur de charges climatiques	55
Figure 48 - Modes de vibration principaux issus de Robot	55
Figure 49 - Allure du premier mode de vibration	56
Figure 50 - Allure du deuxième mode de vibration	56
Figure 51 - Allure du troisième mode de vibration	57
Figure 52 - Cartographie des contraintes normales d'un voile	58
Figure 53 – Boîte de dialogue Résultats réduits pour les panneaux (en haut) et efforts réduits (en bas)	59
Figure 54 - Mécanisme de rupture des poteaux courts. Source : DAVIDOVICI. Conception-construction parasismique	59
Figure 55 - Déplacements relatifs entre étages au séisme	60
Figure 56 - Message d'avertissement d'une instabilité sur Robot.....	60
Figure 57 - Comparaison entre les valeurs des modes de vibration	62
Figure 58 - Tableau synthèse des points forts de chaque logiciel	63