



École des Ponts

ParisTech

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

2019-2020

Projet de Fin d'Etudes

Département Génie Civil et Construction

João BEZERRA DA SILVA NETO

Elève ingénieur, double diplôme

Tuteur professionnel : Yoann Galle

Tuteur académique : Robert Le Roy

Conception des bâtiments en vue de leur déconstruction - Approche théorique et expérimentale

Projet réalisé au sein de SETEC TPI

Immeuble Central Seine, 42/52, quai de la Rapée -75583 Paris

10/02/2020 au 24/07/2020

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes de l'équipe de Setec TPI qui m'ont apporté le soutien nécessaire au développement de ce travail. De plus, je voudrais spécialement remercier mon maître de stage Yoann Galle pour l'effort consacré au développement de mon PFE et pour les conseils donnés au long de mon stage qui se sont avérés essentiels pour mon développement professionnel et académique. Je tiens à remercier Jean-Marc Jaeger, qui est pour moi une source d'inspiration et qui m'a donné des conseils très précieux pour l'avancement de ce travail. Je remercie également Ingrid Bertin pour m'avoir beaucoup aidé avec les questions environnementales.

Je voudrais remercier mon tuteur académique, Robert le Roy, qui m'a donné plusieurs conseils très importants pour guider l'élaboration de ce travail.

Finalement, je tiens à remercier mes amis et ma famille pour leur soutien affectif, qui était essentiel pour me garder motivé tout au long de ce travail.

Résumé

Le regard critique des impacts humains sur l’environnement est l’un des principaux objectifs de l’éco-conception. Dans ce contexte, il émerge le réemploi qui consiste à réutiliser les éléments d’une manière plus durable, en réduisant les déchets, la consommation d’énergie et l’émission de CO₂.

Ce mémoire contient une analyse du comportement des assemblages réversibles, qui seront testés au laboratoire Navier dans le cadre d’un partenariat avec Setec. Les essais seront faits avec des portiques en échelle réduite, qui simulent le comportement des assemblages poutre-poteaux des bâtiments en béton armé. Les études ont été faites en utilisant des modèles éléments finis non-linéaires avec le logiciel Pythagore.

En parallèle, une étude du comportement d’une tour a été menée pour évaluer le comportement vis-à-vis aux efforts horizontaux. Dans cette étude on a fait varier quelques paramètres de la tour, notamment, les raideurs des assemblages en simulant l’aspect des assemblages réversibles.

Finalement, un outil simplifié sur Excel VBA a été développé pour trouver les meilleures optimisations d’une base de données des éléments en béton armé. En utilisant quelques projets, l’application de cet outil a permis de dégager des pistes de conception.

Mots-clés : Réemploi, Eco-conception, Assemblages poutre-poteaux, Pythagore

Abstract

One of the main objectives of eco-design is to take a critical look at human impacts on the environment. In this context, there is reuse, which consists to find a new application for the elements in a more sustainable way, reducing waste, energy consumption and CO₂ emissions.

This thesis contains an analysis of the behavior of reversible assemblies, which will be tested at the Navier laboratory in the context of a partnership with Setec. The tests will be carried out with reinforced concrete frames on a reduced scale, which will simulate the behavior of the beam-column assemblies of buildings. The studies were done using non-linear models with Pythagore software.

In parallel, a study of the behavior of a tower about the resistance of horizontal loads. In this study we varied some parameters of the tower, notably the stiffness of the assemblies by simulating the characteristics of the reversible assemblies.

Finally, a simplified tool on Excel VBA was developed to find the best optimizations of a date base of reinforced concrete elements. Using a few projects, it was possible to apply the tool to find some eco-design ideas.

Keywords: Reuse, Eco-design, Beam-column assemblies, Pythagore

Table des matières

Introduction	11
1. Présentation de l’organisme d’accueil.....	13
2. L’impact environnemental du BTP	14
3. Possibles solutions pour réduire l’impact du BTP	15
3.1 Utilisation des matériaux innovants	15
3.2 Réhabilitation d’une tour existante	16
3.3 Réemploi	19
4. Essais des assemblages réemployables	22
4.1 Principe de la modélisation	24
4.2 Etude paramétrique	26
4.2.1 Loi de comportement du béton.....	26
4.2.2 Loi de comportement des appuis.....	29
4.3 Résultats du modèle Pythagore	31
4.4 Vérifications ELS et ELU	31
4.5 Résultats et consignes pour la réalisation des essais	32
4.6 Description de l’état actuel des essais	33
5. La raideur des assemblages réemployables vis-à-vis des efforts horizontaux	40
5.1 Description du modèle	40
5.2 Etude de l’impact de la variation du module d’Young des assemblages	41
5.3 Etude de l’impact de la raideur des assemblages sur le contreventement.....	47
6. Outil de réemploi d’éléments en béton armé	50
6.1 Méthodologie d’outil.....	51
6.1.1 Données d’entrée bâtiment futur	51
6.1.2 Données d’entrée bâtiment existant	51
6.1.3 Equivalence des sections.....	52
6.1.4 Analyse des résultats	52
6.2 Résultats obtenus.....	53
Conclusion.....	60
Bibliographie.....	61
Annexes.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparatif des émissions de CO ₂ entre les bétons courants et Vertua	16
Tableau 2 : Valeurs calculées pour le béton.....	27
Tableau 3 : Comparatif entre calculs avec et sans la prise en compte de la traction du béton	29
Tableau 4 : Comparaison des résultats entre les différents types d’appuis.....	30
Tableau 5 : Chargement jusqu’à la rupture des éléments.....	31
Tableau 6 : Valeurs limites ELS et ELU de la zone d’assemblage.....	32
Tableau 7 : Valeurs limites ELS et ELU de zone à mi-travée de la poutre.	32
Tableau 8 : Inertie quadratique du Noyau	42
Tableau 9 : Valeurs des longueurs équivalents pour le Noyau	42
Tableau 10 : Déplacement max en fonction du module des assemblages	43
Tableau 11 : Principales informations sur les projets utilisés	56
Tableau 12 : Pourcentages des éléments réemployées.....	56
Tableau 13 : Pourcentages des éléments utilisées de la base de données	57
Tableau 14 : Chutes des éléments réemployée.....	57
Tableau 15 : Gain des poids des solutions analysées	57

Liste des figures

Figure 1 : Chiffres du groupe Setec [20].....	13
Figure 2 : Evolution de la température moyenne annuelle de la planète [14].....	14
Figure 3 : Projet de renouvellement de la tour Montparnasse [18].....	17
Figure 4 : Projet de renouvellement de la tour Aurore [23]	18
Figure 5 : Maison à Strasbourg faite avec la technique de colombage	20
Figure 6 : Construction de la toiture du The London 2012 main Olympic Stadium. [4]	20
Figure 7 : Schéma de réalisation des essais.....	23
Figure 8 : Schéma simplifié du portique	24
Figure 9 : Description du modèle RdM du portique	25
Figure 10 : Attribution des sections dans Pythagore.....	25
Figure 11 : Loi de Sargin pour les bétons C25, C45 et C60	27
Figure 12 : Loi de comportement pour la traction du béton [11].....	28
Figure 13 : Diagramme illustrative de contrainte en flexion simple.....	28
Figure 14 : Comportement élasto-plastique des appuis.	29
Figure 15 : Appui élasto-plastique	30
Figure 16 : Planning d'avancement des essais.....	33
Figure 17 : Ferrailage du portique 3 zones de clavetage en C60	34
Figure 18 : Coulage des poutres.....	35
Figure 19 : Eléments des poutres après finition.	35
Figure 20 : Ferrailage de la zone de clavetage en C60	36
Figure 21 : Livraison des portiques au Laboratoire Navier	37
Figure 22 : Portique 1 avant les essais non-destructifs	38
Figure 23 : Système de capture d'image et de déplacements	38
Figure 24 : Zone de fissuration à mi-travée	39
Figure 25 : Tour Majunga	40
Figure 26 : Modèle RdM Simplifié de la tour Majunga.....	41
Figure 27 : Déformée de la grille de façade sous un chargement horizontal	43
Figure 28 : Schéma de modélisation des poutres	43
Figure 29: Déplacements en tête avec 100% du Noyau.....	44
Figure 30 : Déplacements en tête avec 50% du Noyau.....	45

Figure 31 : Déplacements en tête avec 10% du Noyau.....	45
Figure 32 : Déplacements en tête avec 5% du Noyau.....	46
Figure 33 : Déplacements en tête sans Noyau.....	46
Figure 34 : Schéma de modélisation des poutres avec des ressorts	47
Figure 35 : Déplacement en tête de la tour : cas 10 étages	47
Figure 36 : Déplacement en tête de la tour : cas 15 étages	48
Figure 37 : Déplacement en tête de la tour : cas 20 étages	48
Figure 38 : Déplacement en tête en fonction de l'inertie de rotation.....	49
Figure 39 : Logigramme simplifié de l'outil de réemploi.....	51
Figure 40 : Etage courant Tour Majunga	53
Figure 41 : Repérage des poteaux de façade de la Tour Triangle © Herzog & De Meuron...	54
Figure 42 : Coupe Aile Arche - THE LINK © Setec tpi.....	55
Figure 43 : Coupe bâtiment E1-C - Village Olympique	55

Liste des abréviations

ACV : Analyse du Cycle de Vie

APS : Avant-projet Sommaire

BTP : Bâtiment et travaux publics

ELS : Etat de Limite de Service

ELU : Etat de Limite Ultime

IGH : Immeuble de grande Hauteur

SETEC : Société d’Etudes Techniques et EConomiques

RDM : Résistance Des Matériaux

TPI : Travaux Publics et Industriels

VBA : Visual Basic for Applications

Liste des annexes

Annexe 1 : Calcul solution optimisée pour les émissions de CO₂ : Village Olympique ...	65
Annexe 2 : Réhabilitation d’une tour existante	68
Annexe 3 : Plans de ferrailage des portiques.....	72
Annexe 4 : Sections définies dans Pythagore	76
Annexe 5 : Codes VBA.....	79

Introduction

Dans le monde, la consommation des ressources naturelles et d'énergie augmente à chaque année. Ceci devient de plus en plus évident, qu'il faut une nouvelle posture vis-à-vis de la préservation de notre planète. Dans ce contexte, le BTP se distingue comme l'un des secteurs qui a le plus d'impact sur l'environnement et qui soit responsable de plus de la moitié des matériaux utilisés en Europe [8].

De plus, le secteur de la construction est responsable d'un tiers des émissions de gaz carbonique dans le monde [8]. En 2015, le secteur a représenté 11% des émissions mondiales de CO₂, parmi lesquels 8% rien que pour la production de ciment [15]. Dans ce scénario, la nécessité de trouver des solutions à ce problème semble évident.

En premier lieu, on peut penser à réduire la quantité de matériaux utilisés dans la construction. Cette solution semble très intéressante, car on peut réaliser des structures plus optimisées et ainsi réduire l'utilisation des matériaux. Cependant, cette méthode est limitée, car il n'y a pas beaucoup de place pour optimiser les structures, puisque trouver la structure optimisée est déjà une pratique des bureaux d'études.

De plus, on pourrait penser à utiliser d'autres types de matériaux, comme le bois et le béton à faible impact environnemental. Ce type de solution semble très prometteur, car la même structure peut être réalisée en utilisant un matériau à moindre impact environnemental.

Enfin, on a le réemploi des éléments. Dans ce cas, on pourrait économiser les matériaux et l'énergie liée à la production des éléments. Toutefois, l'utilisation de cette méthode dans le BTP reste toujours très limitée. Dans ce mémoire, on se concentrera sur l'étude du réemploi des éléments en béton armé en accord avec la thèse d'Ingrid BERTIN [5].

Les résultats apportés par la suite s'articulent autour du réemploi des éléments en béton armé. Dans un premier temps on analysera le comportement des portiques en échelle réduite, dans une vision de simuler l'aspect des assemblages réemployables. L'étude faite consiste à modéliser les portiques avec des modèles non-linéaire sur Pythagore pour donner des consignes pour la réalisation des essais.

Dans un deuxième temps, on va analyser l'influence des raideurs des assemblages d'une tour vis-à-vis du contreventement. L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des assemblages réemployables dans le contreventement d'une tour.

Finalement, on a développé un outil que permettra d'utiliser des bases de données pour réemployer dans un projet. Pour réaliser cette étude, on a utilisé plusieurs projets récents comme données d'entrée. L'ambition principale de cet outil est de mettre en évidence les stratégies qu'il est nécessaire de mettre en œuvre lors de la conception de structures pour permettre ultérieurement leur réemploi.

1. Présentation de l’organisme d’accueil

SETEC (Société d’Etudes Techniques et EConomiques) a été fondée par Henri Grimond et Guy Saias en 1957 à Paris, actuellement, le groupe possède une remarquable importance en France et à l’international. En 2019 le chiffre d’affaire du groupe était de 329 M€ et dans cette période l’entreprise avait 3000 collaborateurs répartis dans 40 sociétés opérant dans 20 pays [20].

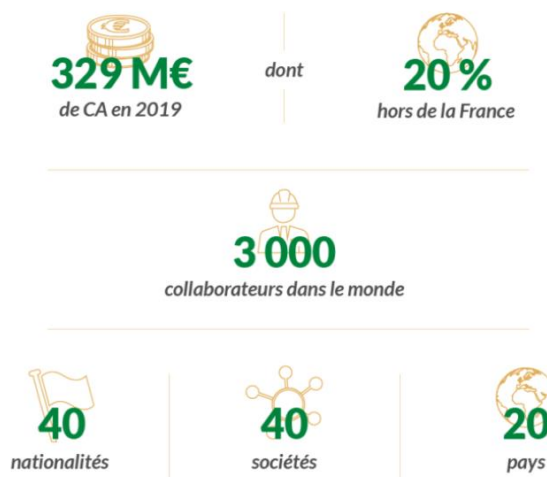


Figure 1 : Chiffres du groupe Setec [20]

Les activités du groupe Setec s’étendent dans plusieurs domaines d’activité, Setec étant divisée en plusieurs filiales. Le travail développé dans ce mémoire était fait au sein de la filiale Setec TPI (Travaux Publics et Industriels). En 2018, la filiale Setec TPI possédait un effectif de 358 personnes avec un chiffre d’affaire de 55 M€ [13]. Setec TPI est spécialisée dans le génie civil, les structures complexes et les immeubles de grande hauteur.

Le groupe Setec est fortement engagé dans la réduction des impacts environnementaux du secteur BTP. De cette façon, le groupe est extrêmement engagé dans les causes environnementales, utilisant souvent les concepts d’économie circulaire qui dans le contexte du groupe se traduisent dans le développement de : l’éco-conception, l’analyse comparative de cycles de vie, l’étude de scénario de réemploi et l’utilisation des matériaux avec un bas impact carbone [19].

2. L'impact environnemental du BTP

Le réchauffement climatique met en évidence l'impact de l'Homme sur la planète. Depuis la révolution industrielle, l'Homme a commencé à produire de plus en plus de gaz à effet de serre, notamment le CO₂. La conséquence de cette pollution, la température de la décennie de 2001-2010 était de 0.48°C plus chaude que la moyenne 1961-1990 [14].

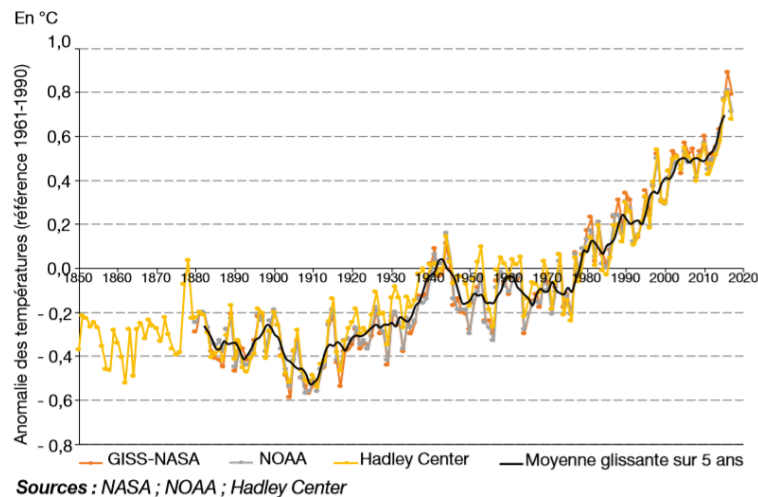


Figure 2 : Evolution de la température moyenne annuelle de la planète [14]

Dans ce contexte, le BTP est responsable de 11% des émissions de CO₂ dans le monde [15]. En 2016, la production du ciment représente 10% des émissions des procédés industriels [14].

Un autre problème du secteur du BTP c'est la grande production de déchets. En France, le secteur de la construction est responsable de 228 millions de tonnes de déchets [12].

De cette façon, le secteur du BTP se distingue comme l'un des secteurs qui a le plus d'impact sur l'environnement. Il faut donc trouver des solutions qui permettront de réduire les impacts causés par le secteur du BTP. Le gouvernement et les entreprises doivent prendre les mesures nécessaires pour trouver des solutions pour résoudre ce problème.

3. Possibles solutions pour réduire l’impact du BTP

Pour répondre aux défis environnementaux qui ont été mis en évidence au chapitre précédent, il est possible de déployer plusieurs stratégies dans le secteur du BTP. Dans ce contexte, on peut utiliser la démarche de l’économie circulaire dans le bâtiment, qui a comme principale objective réduire les impacts environnementaux. Dans cette optique, HQR-GBC a défini 15 leviers pour stimuler l’économie circulaire dans le contexte du BTP, parmi ces pistes on peut mettre en évidence : l’approvisionnement durable ; la conception durable ; la démontrabilité et déconstruction sélective ; le réemploi et réutilisation ; l’évolutivité du bâtiment [3].

Au cours de mon PFE, j’ai eu l’occasion de travailler sur plusieurs projets dans lesquels ces pistes étaient présentes. Les paragraphes suivants vont aborder certaines de ces démarches qui sont prises pour privilégier l’éco-conception. Finalement, on abordera à la fin de ce chapitre le réemploi des éléments qui sera le volet principal de ce travail.

3.1 Utilisation des matériaux innovants

On peut utiliser des matériaux innovants pour réduire l’impact du secteur du génie civil. Dans cette approche, le but c’est de remplacer des matériaux qui ont un impact très important, par des matériaux avec moins d’impacts environnementaux.

Dans ce cas, on peut citer le projet du village olympique de Paris, qui accueillera les athlètes olympiques et paralympiques aux Jeux de 2024 à Paris. Dans ce projet, l’une des principales exigences était de faire un projet avec un bas impact environnemental.

Par conséquent, ce projet est un bon exemple de la façon dont il peut réduire l’impact environnemental du secteur de la construction. Dans ce cas, la solution était : l’utilisation de matériaux à faible impact environnemental comme par exemple : la mise en valeur du bois comme solution structurale ; le choix des bétons une bas empreinte carbone basse.

Le tableau ci-dessous montre une comparaison entre les bilans carbone de différents types de bétons [21] :

Tableau 1 : Comparatif des émissions de CO₂ entre les bétons courants et Vertua

Classe d'exposition	Résistance	Béton Courant	Béton VERTUA	Ratio entre les bilans Carbone
		Kg Co2/m3	Kg Co2/m3	
XC1	C25/30	225,56	112,56	49,9%
	C30/37	241,88	126,89	52,5%
	C35/45	270,63	140,51	51,9%
	C40/50	297,92	152,74	51,3%
XF1	C25/30	241,32	114,43	47,4%
	C30/37	241,88	126,89	52,5%
	C50/60	343,62	165,57	48,2%
XF2	C25/30	277,14	129,87	46,9%
	C30/37	296,73	138,33	46,6%
XD3	C35/45	-	142,17	-
XA2	C35/45	-	142,17	-

Pendant la phase APS du projet du Village Olympique, on devrait choisir les sections des éléments en béton armé. La démarche utilisée : on a calculé la quantité de CO₂ produite avec les différents types de béton. Finalement, on a choisi la solution avec le moins d’impact environnemental. La démarche calculatoire est présentée dans l’Annexe 1.

Ce projet était très intéressant, car il permettrait en phase de conception d’utiliser le bois et le béton à bas impact carbone, pour réaliser un projet avec un impact carbone plus réduit. Ainsi, on peut conclure que le calcul des impacts environnementaux en phase de conception peut être un moyen très efficace à utiliser pour réduire les impacts des projets.

3.2 Réhabilitation d’une tour existante

Dans cette partie, on abordera la réhabilitation des tours, qui est un sujet qui devient plus récurrent avec le vieillissement des tours. L’objectif de cette démarche est de profiter d’une structure existante pour faire un nouveau projet. Dans ce cas, on peut bénéficier de quelques parties la structure existante comme base pour un nouveau projet. Par rapport à la solution de reconstruire le bâtiment à nouveau, cette démarche semble très intéressante, car on peut diminuer la consommation des ressources et éventuellement faire un projet avec moins d’impact sur l’environnement.

Dans le cas des IGH : la durée de vie est plus longue que celles des bâtiments courants, ils sont rarement démolis et leur réhabilitation est un sujet d’avenir. On peut citer, à titre d’illustration, quelques projets de réhabilitation pour illustrer mieux cette problématique.

Dans ce cadre, on va analyser le projet de la réhabilitation de la Tour Montparnasse. L’ambition principale de ce projet de réhabilitation c’est de donner une nouvelle identité à la tour en améliorant l’usage de la tour en termes de confort et de consommation d’énergie [22]. Dans ce projet, il est prévu de modifier toute la façade de la tour et réaménager son intérieur, notamment, les étages inférieurs et les derniers étages. L’image ci-dessous montre la tour après le renouvellement.



Figure 3 : Projet de renouvellement de la tour Montparnasse [18]

En deuxième lieu, on peut citer la tour Aurore, qui est située à la Défense. Dans ce projet de réhabilitation la tour augmentera, de six niveaux, tout en donnant une architecture plus moderne. La Figure 4, montre une image du projet finalisé.



Figure 4 : Projet de renouvellement de la tour Aurore [23]

Au cours de mon PFE chez Setec, j’ai eu l’occasion de travailler dans un projet de réhabilitation d’une tour à la Défense, en phase de faisabilité. Pour raisons contractuelles et de confidentialité, on appellera la tour étudiée de Tour X. Cette étude de faisabilité a été demandée par le gestionnaire de la tour, qui voulait augmenter la surface exploitable de la tour. Les calculs sont présentés dans l’Annexe 2.

Dans cette étude, on a étudié plusieurs scénarios, dans lesquels on propose différentes solutions pour augmenter le nombre d’étages de la tour en gardant, si possible, la configuration actuelle de l’infrastructure et de la superstructure.

Le premier scénario consiste à revoir les hypothèses de charges, car on voulait diminuer la valeur de la descente de charges. Cela était possible, car on peut limiter les charges d’exploitation et on peut préciser les charges permanentes, qui étaient surestimées dans les calculs de l’époque. Avec cette démarche, on a conclu qu’il était possible d’augmenter d’un étage la tour existante en restant avec la même descente de charge.

Le deuxième scénario consiste à renforcer le noyau central, cela permettra de rajouter plusieurs étages supplémentaires, qui seront appuyés sur le noyau central. De cette façon, je peux augmenter la hauteur de la tour sans avoir besoin de changer son infrastructure, car les charges seront transmises par le noyau renforcé. Les points positifs de cette solution sont : on maîtrise mieux la descente de charges ; on ne charge pas l’existant de la superstructure.

Le troisième scénario consiste à faire une intervention plus lourde, dans ce cas les nouveaux étages sont appuyés sur le noyau central et sur des poteaux qui descendront jusqu’à l’infrastructure. Cette solution permettra de gagner plus de surface, mais sera la plus coûteuse.

La réhabilitation des tours semble une bonne solution pour « réutiliser » la structure existante. Cependant, cette méthode a ses limitations, car on reste toujours limité par la configuration actuelle de la structure et on a des difficultés à maîtriser l’existant, notamment, pour les projets dont on n’a pas toute la documentation nécessaire pour identifier et qualifier tous les éléments de la tour.

3.3 Réemploi

Dans ce chapitre, on va aborder une autre solution possible pour réduire les impacts du BTP : le réemploi. Pour commencer, on présentera la définition du réemploi selon le Code de l’environnement Français – Article L541-1-1 :

« Réemploi : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus » [10]

L’homme utilise le réemploi depuis longtemps, comme par exemple les civilisations romaine, grecque et égyptienne, qui ont réutilisé des briques et des pierres des ruines pour faire de nouveaux bâtiments [8]. En France à partir du Moyen Âge, une technique très utilisée était le colombage des éléments, qui consiste à faire une structure massive en bois avec les vides remplis de torchis, briques ou terre [6]. Avec cette technique, il a été possible de déconstruire et reconstruire de la structure ailleurs, permettant le réemploi des poutres et poteaux en bois.



Figure 5 : Maison à Strasbourg faite avec la technique de colombage

Au passé, la principale motivation pour faire du réemploi était de réduire le travail associé à la production des éléments et aussi à la difficulté de trouver des matières premières. Cependant, avec l’industrialisation des processus il est devenu plus économique et simple de faire les structures à partir du nouveau [8]. Parallèlement à la demande croissante de nouveaux bâtiments, cela conduit au scénario actuel du BTP dans lequel il est le secteur qui cause le plus d’impacts environnementaux.

Plus récemment, on peut citer la construction de la toiture en acier du The London 2012 main Olympic Stadium, dans laquelle une partie de la structure a été faite avec des tubes en acier, sur-commandées, destinée à la construction d’un pipeline. Dans ce projet, il a été réemployé plus de cinq milliers de tonnes d’acier [17].

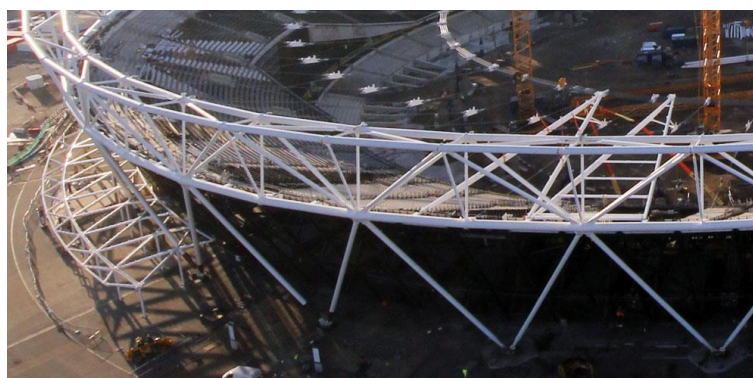


Figure 6 : Construction de la toiture du The London 2012 main Olympic Stadium. [4]

Le recyclage, à la différence du réemploi, vise à revenir aux matières premières, étant souvent associé à une grande consommation d’énergie et aussi lié à une perte en termes de qualité du

BEZERRA DA SILVA NETO João – Département Génie Civil et Construction

matériau. Par conséquent, selon le cas étudié, le réemploi peut être une solution très efficace pour diminuer les impacts du secteur de la construction, cela donne la motivation pour explorer plus ce domaine, qui, aujourd’hui, est peu utilisé.

Les sujets abordés dans ce mémoire sont orientés vers l’étude du réemploi des éléments en béton armé. Dans les paragraphes suivants, on va analyser le comportement en échelle réduite d’un portique en béton armé avec des assemblages réversibles. Après, on va analyser l’impact des assemblages dans le contreventement d’une tour, pour faire cela, on va utiliser des modèles en éléments finis sur Pythagore d’un projet existant. Par la suite, on utilisera un outil pour trouver les meilleures solutions pour utiliser une base de données dans un projet existant.

4. Essais des assemblages réemployables

La principale motivation pour réaliser les essais est de valider une possible méthode pour réemployer les éléments en béton armé. Cette méthode consiste à désassembler les liaisons poutres-poteaux, ce qui permettra ensuite le réemploi de ces éléments. Dans ce cas, la connexion entre les poutres et poteaux est faite avec des zones de clavetage, qui seront démolis puis reconstruits tout en permettant la réversibilité de la structure.

Ces essais visent à simuler le comportement réel d’un bâtiment dans lequel cette méthode a été utilisée. Vu l’impossibilité de réaliser cet essai avec les dimensions réelles d’un bâtiment, il a été décidé d’utiliser des portiques réduits d’une échelle 1/3. Différents types de recouvrements seront utilisés pour la réalisation de cet essai avec différents types de bétons pour les zones de clavetage.

L’étude portée sur ces portiques est une continuation des essais prévus par Charlotte Borrits lors de son PFE [7]. Dans son étude, il était démontré que les raideurs des assemblages sont un paramètre très important pour le dimensionnement de la structure, en l’occurrence on ne dispose pas de bases théoriques et expérimentales pour estimer cette raideur d’assemblage qui a été démolie puis reconstruite. Par conséquent, les essais sont fondamentaux pour démontrer la faisabilité de ces assemblages et aussi leur comportement structural.

Les essais seront réalisés en deux étapes de chargement. La première étape consiste à charger le portique jusqu’à sa limite élastique. Après cette étape, la poutre est déconstruite et reconstruite. La deuxième étape consiste à charger le portique reconstruit jusqu’à la rupture. La Figure 7 montre un schéma simplifié de la réalisation de ces phases d’essais.

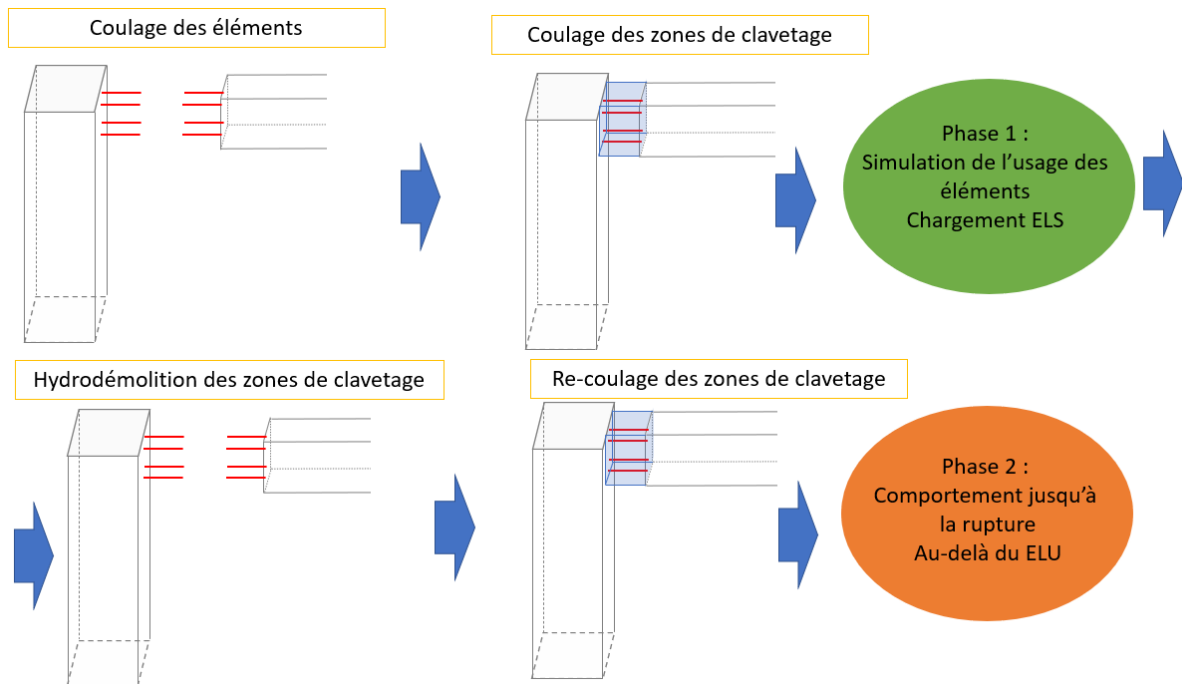


Figure 7 : Schéma de réalisation des essais

Dans la réalisation de cet essai, des informations sur le comportement de l'ouvrage seront mesurés : les déplacements, les contraintes et les raideurs. Ces données seront obtenues par prise vidéo, avec des mesures supplémentaires en utilisant des jauges de calage. La mesure des contraintes sera réalisée par des capteurs de contraintes.

Les éléments du portique sont faits avec un béton du type C60. Après ces éléments sont réassemblés avec des bétons des types C25, C45 et C60 (zones de clavetage). l'Annexe 3 montre les dispositions de barres et les longueurs de recouvrement des quatre portiques. L'internet principal est de tester les zones de clavetages avec des types différents de bétons pour analyser :

- L'influence du type de béton dans le comportement structural, notamment, les raideurs des assemblages.
- La possibilité de démolir les assemblages avec des bétons de différents types. On attend que les zones de clavetage en C60 soient plus dures, ils seront donc plus difficiles à démonter.
- L'impact des différents types de recouvrement de barres pour chaque type de béton

Ces portiques seront testés à l'été de 2020 au laboratoire Navier à L'ENPC. Pour la réalisation des essais il sera employé un vérin de capacité maximale de 450kN, qui travaille à déplacement contrôlé. Il est prévu de réaliser un chargement ponctuel à mi-portée des portiques. Des systèmes de boîtes à sable sont prévus en pied des portiques pour assurer la rotation en pied.

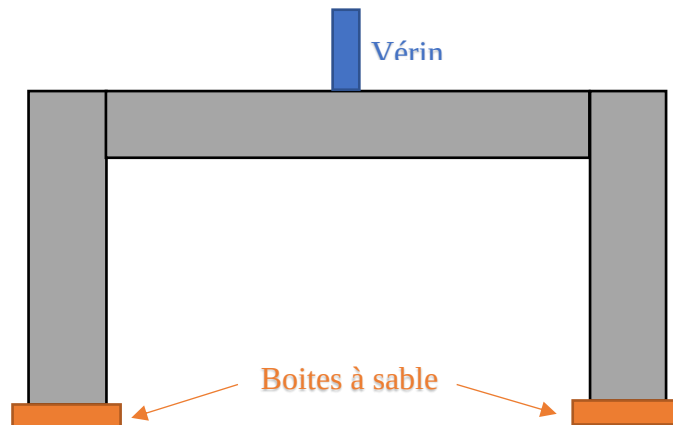


Figure 8 : Schéma simplifié du portique

4.1 Principe de la modélisation

L'ambition de ce calcul est de modéliser le comportement du portique et vérifier le résultat des essais de laboratoire. De cette façon, on a décidé de réaliser un modèle sur Pythagore (Logicielle interne de Setec, qui fait des modèles éléments finis) avec un calcul non-linéaire pour le comportement du portique. Dans ce calcul, il était possible de prendre en compte la fissuration du portique avec un calcul interactif, de cette manière on peut mieux prédire le comportement réel du portique. La Figure 9 montre le schéma statique RdM du portique dans Pythagore.

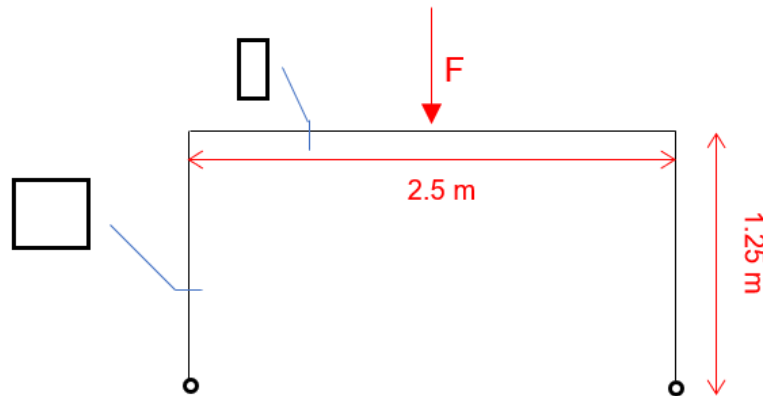


Figure 9 : Description du modèle RdM du portique

Dans Pythagore, les appuis seront modélisés comme rotules parfaites. Un autre calcul en considérant des encastremets sera effectué pour comparer les résultats obtenus. Les calculs sont faits en considérant les sections homogénéisées fissurées. Le portique dans Pythagore est fait en utilisant les sections suivantes :

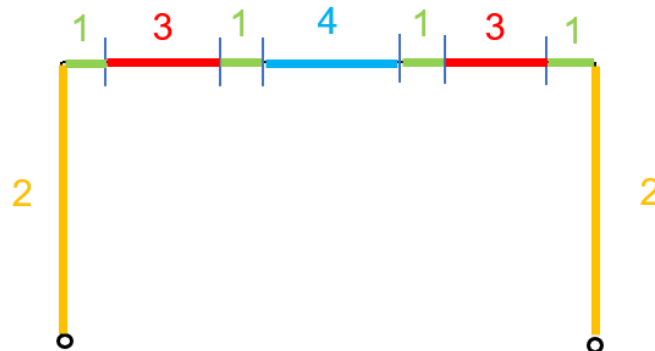


Figure 10 : Attribution des sections dans Pythagore

On peut donc diviser les sections utilisées dans Pythagore en 4 types :

- Type 1 : Section courante poutre avec du C60
- Type 2 : Section courante poteau avec du C60
- Type 3 : Section zone de clavetage
- Type 4 : Section zone de renfort avec du C60

Les longueurs d’affection des types sont calculées en considérant les longueurs d’ancrage et recouvrement des barres de L’EC 2 section 8 [1]. Les images des sections sont affichées dans l’Annexe 4.

Les zones de clavetage seront faites avec du C25, C45 et C60. Dans un premier temps, il était imaginé une solution avec les zones de clavetage avec du C80, mais cette solution a été abandonnée, car l’usine dans laquelle les portiques étaient fabriqués ne maîtrisait pas la production des bétons de résistance au-delà de C60.

4.2 Etude paramétrique

Dans ce chapitre, on va étudier l’influence des de plusieurs paramètres de modélisation sur les résultats. On va faire varier les paramètres de la modélisation des portiques : la loi du béton et la loi de comportement des appuis. L’avantage de faire ce type d’analyse paramétrique c’est de dimensionner les sections avec sécurité, mais aussi de mieux comprendre le comportement du portique.

4.2.1 Loi de comportement du béton

Pour l’analyse structurale, l’Eurocode 2 § 5.8.6 impose de prendre en compte une loi contrant-déformations du béton telles que définie dans le paragraphe §3.1.5 du Eurocode. On a décidé de ne pas prendre en compte les effets de fluage du béton, car les chargements sont effectués d’une façon rapide. Le comportement est donc défini comme :

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$

Dans laquelle :

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$
$$k = 1.05 E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$$

En respectant la valeur nominale de la déformation ultime :

$$0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}|$$

On peut donc définir le graphique suivant pour la loi de comportement du béton :

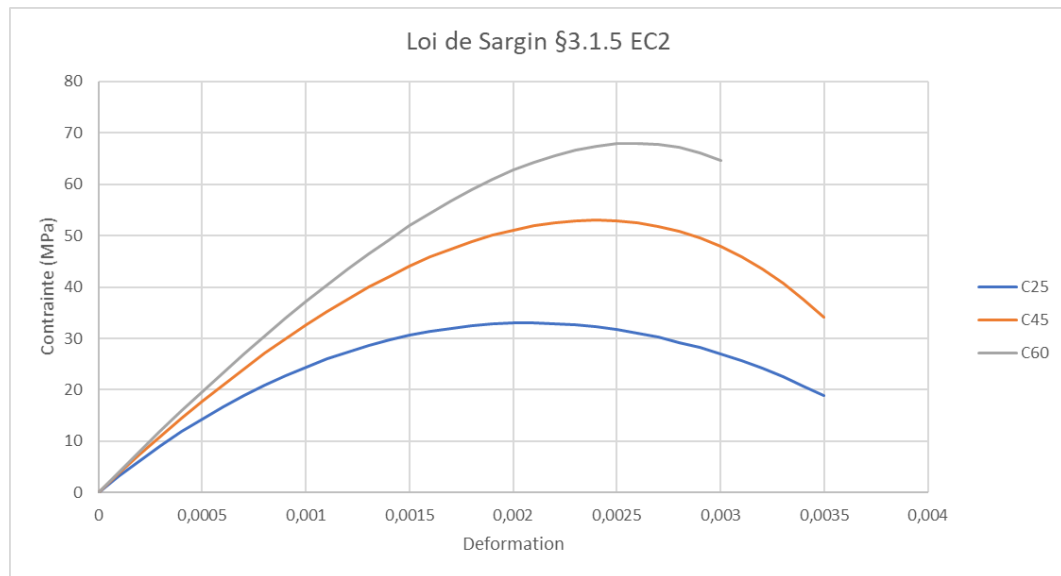


Figure 11 : Loi de Sargin pour les bétons C25, C45 et C60

Les valeurs sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Valeurs calculées pour le béton.

	C25	C45	C60
F_{ck}	25	45	60
F_{cd}	17	30	40
F_{cm}	33	53	68
E_{cm}	31,476	36,283	39,100
ε_{c1}	0,00207	0,00240	0,00259
ε_b	0,00621	0,00719	0,00777
k	2,07248	2,53639	1,56326
k''	0	0	0
ε_{uc1}	0,0035	0,0035	0,003018

Un deuxième calcul est fait en prenant en compte les efforts de traction, sur Pythagore les efforts seront prises comme indiqué dans la Figure 12. Par conséquent, la loi de comportement du béton sera définie avec la loi de Sargin pour les parties en compression et avec une loi linéaire jusqu'à la limite de fissuration avec une résistance résiduelle, la Figure 13 montre d'une façon simplifiée la loi de comportement du béton.

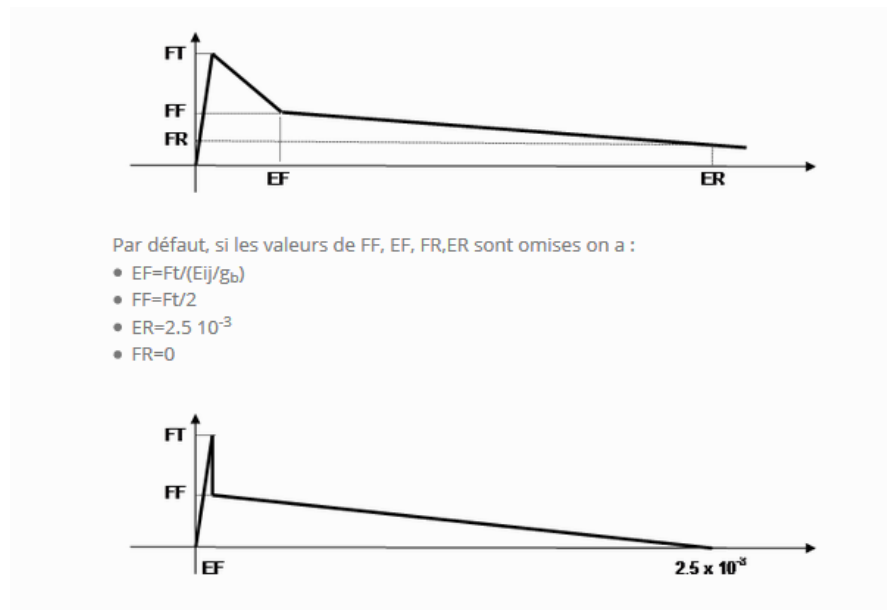


Figure 12 : Loi de comportement pour la traction du béton [11]

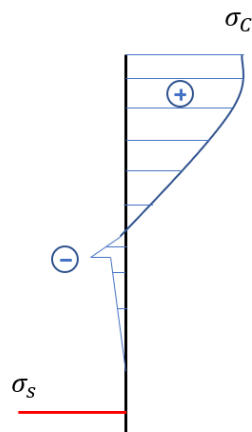


Figure 13 : Diagramme illustrative de contrainte en flexion simple

Le tableau ci-dessous montre quelques résultats avec les deux lois de comportement du béton avec et sans prise en compte de la raideur du béton en traction. Cette analyse est faite en considérant une charge ponctuelle de 50 KN appliquée à mi-travée de la poutre (le poids propre du portique est prise en compte aussi dans les calculs) :

Tableau 3 : Comparatif entre calculs avec et sans la prise en compte de la traction du béton

	Moment mi-travée	Moment assemblage	Déformée mi-travée
C25	17,972 kN.m	-14,157 kN.m	1,34 mm
C25 traction	17,648 kN.m	-14,464 kN.m	0,68 mm
C45	17,925 kN.m	-14,204 kN.m	1,33 mm
C45 traction	17,344 kN.m	-14,768 kN.m	0,65 mm
C60	17,892 kN.m	-14,237 kN.m	1,32 mm
C60 traction	17,216 kN.m	-14,897 kN.m	0,64 mm

Ce tableau montre que la courbe de moment ne change pas trop entre les lois de comportement du béton avec et sans la prise en compte de la traction. Cependant, la déformée à mi-travée est fortement impacté par la prise en compte de la raideur de traction du béton. Pour les calculs suivants, on va considérer ces deux lois de comportement pour faire l'analyse des résultats.

Obs. : On a décidé de faire un calcul avec une force de 50 kN, car avec cette charge on peut bien montrer l'impact de la prise en compte de la traction du béton, car on reste dans le domaine dans laquelle le béton est peu fissuré.

4.2.2 Loi de comportement des appuis

Les portiques seront posés sur des boîtes à sable que permettront la rotation en pied du portique. On va donc considérer que les portiques sont rotulés au niveau des appuis. Ce chapitre vise à étudier l'impact du type d'appui utilisé dans la modélisation. Dans ce cas, on va analyser trois types des appuis : rotule, ressort (élasto-plastique) et encastrement.

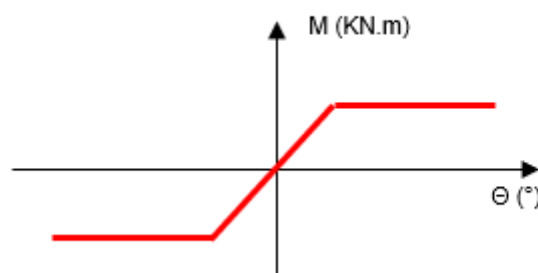


Figure 14 : Comportement élasto-plastique des appuis.

La Figure 14 indique une loi de comportement d'un appui élasto-plastique, avec le comportement linéaire jusqu'à la limite élastique. Pour illustrer ce comportement, on a fait quelques hypothèses, on a défini ce type d'appui comme une section de béton (C60) d'épaisseur de 2 cm (enrobage usuel). Le moment maximal est défini comme le moment causé par un diagramme triangulaire de contraintes avec une résultante à $\frac{1}{4}$ de la hauteur de la section. Pour ces portiques, on revient à une raideur de 24MN.m/rad , avec un comportement élastique jusqu'à une rotation de $3,45.10^{-4}/\text{rad}$.

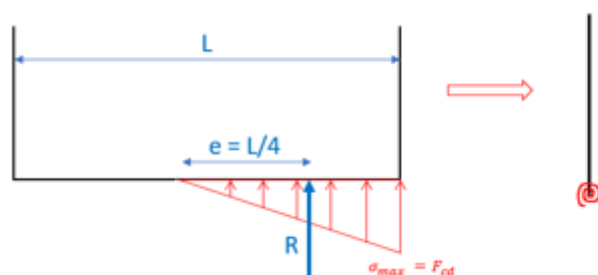


Figure 15 : Appui élasto-plastique

En utilisant le modèle du portique fait avec les zones de clavetage de C60 (portique 2 dans l'Annexe 3), on a fait varier les types d'appuis pour voir l'impact sur les courbes de moment du portique. Le Tableau 4 montre les valeurs des moments pour un cas de charge de 150 KN sur Pythagore.

Tableau 4 : Comparaison des résultats entre les différents types d'appuis

Type d'appui	Moment mi-travée	Moment assemblage	Moment encastrement	Ecart du Moment mi-travée
Rotulé	53.16 KN.m	-41.46 KN.m	0	0
Elasto-plastique	52.51 KN.m	-42.12 KN.m	14.16 KN.m	1.2%
Encastrement	51.85 KN.m	-42.78 KN.m	31.39 KN.m	2.5%

On a fait cette analyse pour voir l'impact du type d'appui dans les valeurs des efforts sur le portique. Cette étude montre que globalement on n'a pas des écarts importants pour les moments mi-travée et ni pour les moments sur les assemblages, qui sont les éléments les plus importants dans l'étude des assemblages. Par conséquent, dans les calculs suivants, on va considérer toujours les appuis comme rotules.

4.3 Résultats du modèle Pythagore

Dans ce chapitre on va présenter les résultats prévus par Pythagore, qui permettent de prédire le comportement réaliste du portique, c'est-à-dire calculer les sollicitations et les déplacements, avec les lois de comportement les plus réalistes, dans ce cas on utilisera la loi de Sargin avec la prise en compte d'effort de traction.

Le tableau ci-dessous, montre les résultats calculés par Pythagore, pour les portiques 1, 2, 3 et 4. La colonne Charge de rupture ELU montre la valeur maximale de charge admissible en considérant un béton avec une loi de comportement parabole-rectangle (sans prise en compte de la traction).

Tableau 5 : Chargement jusqu'à la rupture des éléments

	Déformation à mi-travée (mm)	Charge du vérin à la rupture (kN)	Charge de rup. ELU
Portique 1	-4,02448	155	121
Portique 2	-3,97671	156	121
Portique 3	-3,97671	156	121
Portique 4	-3,97813	155	121

Dans le modèle de calcul, la rupture est faite dans les éléments situés au niveau des assemblages entre le poteau et les poutres. Dans le modèle Pythagore, ces éléments correspondent aux morceaux de poutres en C60 entre le poteau et la zone de clavetage.

Obs. 1 : La charge de rupture est calculée en augmentant sa valeur jusqu'au moment que le logiciel Pythagore ne converge plus. Cela indique qu'il n'existe plus une situation d'équilibre, que dans ce cas on interprète comme la rupture du portique. Ce cas c'est une extrapolation du résultat de l'outil afin de prédire les charges de rupture, il n'est pas un calcul de dimensionnement.

Obs. 2 : On a décidé d'utiliser la loi du béton sans prise en compte de la traction pour les calculs ELU, car les calculs à l'ELU on fait l'hypothèse que les efforts de traction sont négligeables.

4.4 Vérifications ELS et ELU

Pour les calculs à l'ELS et à l'ELU de la section, on va considérer une combinaison de coefficients de minoration de 1.5 pour la résistance du béton et de 1.15 pour la résistance de

l'acier. En revanche, pour les forces appliquées, on ne va pas considérer des coefficients de pondération sur les charges, car on connaît exactement la force appliquée (Force appliqué par le Vérin).

En analysant les sections critique du portique, on peut déterminer le tableau suivant, avec les moments résistants de chaque section.

Tableau 6 : Valeurs limites ELS et ELU de la zone d'assemblage

Section clavetage		
Type de béton	ELS moment résistant (kN.m)	ELU moment résistant (kN.m)
C25	-20.8	-31.7
C45	-29.4	-33.0
C60	-29.5	-33.8

Les moments résistant pour la section a mi-travée est déterminé comme :

Tableau 7 : Valeurs limites ELS et ELU de zone à mi-travée de la poutre.

Section mi-travée		
Type de béton	ELS moment résistant	ELU moment résistant
C60	50,1	56.1

On va donc déterminer la charge maximale que le portique peut résister sans dépasser les valeurs de ELS et ELU. La charge que respect toutes les combinaisons est une charge de 73 kN (On arriver à la limite ELS de la section de clavetage pour le portique 1, qui a la zone de clavetage en C25)

On propose de charger les portiques à une charge de 70 KN pour assurer le non-endommagement pendant les essais non-destructives.

4.5 Résultats et consignes pour la réalisation des essais

Les principales conclusions du modèle qui ont été communiquées au Laboratoire pour la réalisation de l'essai sont :

1^{ère} Phase d'essai (Non-destructive) :

- La charge pour simuler l'usage est de 73 kN, (Charge calculé en utilisant la méthode classique de calcul pour déterminer les valeur ELS et ELU) => On propose charge d'essai de 70kN.
- Avec la charge d'essai de 70kN, on attend un déplacement entre 1 et 2 mm

2^{ème} Phase d'essai (Rupture) :

- La charge calculée à l'ELU est de 121 kN
- La charge de rupture calculé par Pythagore est au tour de 156 KN (Valeur sans considérer les coefficients de sécurité avec une extrapolation). Cette charge vise juste à prédire la valeur limite de chargement.
- La déformé à mi-travée est au moment de la rupture est de l'ordre de 4 mm

4.6 Description de l'état actuel des essais

Le Figure 16 ci-dessous montre le planning de la réalisation des essais. Les dates affichées en rouges dans ce planning sont des prévisions pour la réalisation de chaque phase. Il faut noter qu'entre chaque coulage et la réalisation des essais, il faut prévoir au moins 28 jours pour assurer les bonnes résistances pour le béton.

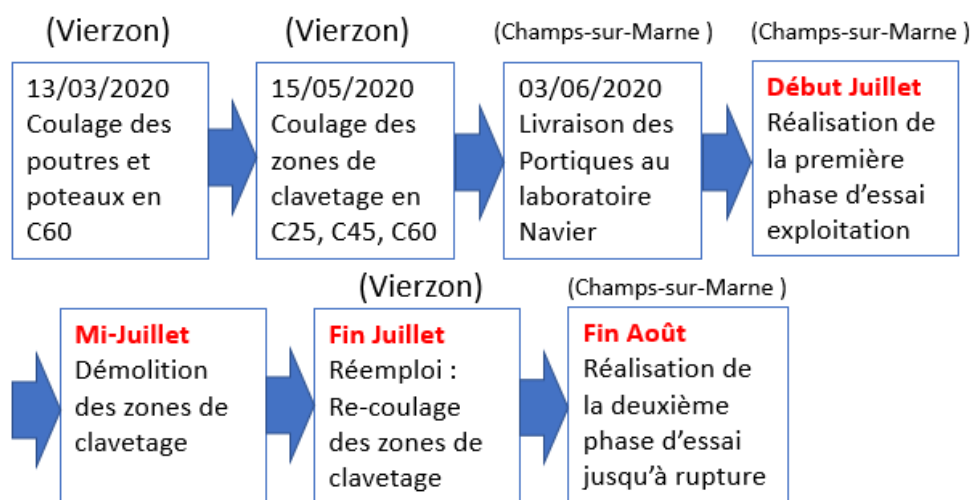


Figure 16 : Planning d'avancement des essais

L'entreprise Degaine (filiale de Vinci) était en charge de la fabrication de ces portiques. Dans ce cadre, ils ont décidé de fabriquer les portiques dans l'usine ABPC, qui se situe à Vierzon.

Dans la Figure 16, il est marqué l'endroit où chaque étape sera effectuée, pour la phase de démolition des assemblages on n'a pas confirmé le chantier où il sera réalisé l'hydrodémolition des assemblages. Les images suivantes vont présenter quelques aspects pratiques de la réalisation des portiques.



Figure 17 : Ferrailage du portique 3 zones de clavetage en C60

Dans la Figure 17, on peut voir les barres croisées de la zone de clavetage en C60, on peut voir aussi le dispositif fait en bois avec une grille en acier, qui était mis pour arrêter le coulage du béton.



Figure 18 : Coulage des poutres

Dans la Figure 18, on peut voir le coulage d'une poutre en C60, on peut remarquer la présence des barres en bout de la poutre qui feront partie de la zone de clavetage, ces éléments permettront la liaison entre poutre et poteaux. Dans cette image, on peut voir aussi les barres en U qui sortent du béton frais, ces barres sont mises pour faciliter la manipulation des éléments.



Figure 19 : Eléments des poutres après finition.

La Figure 19 montre un ouvrier faisant la finition de la surface du béton, qui à ce moment était déjà vibré. On peut aussi voir que sur chantier les ouvriers utilisent des moules mobiles (Barre en bleu) pour couler les éléments, ce type de moule est très intéressant, car il peut être réutilisé presque indéfiniment.



Figure 20 : Ferrailage de la zone de clavetage en C60

La Figure 20 montre la disposition des barres avant le coulage des zones de clavetage. Dans cette image on peut voir que les barres sont légèrement tordues, cette configuration n'était pas prévue en avance. Cette configuration est arrivée parce que les barres de la zone de clavetage ont été quelques centimètres plus hauts que le prévu. Comme retour d'expérience on a conclu qu'il faut prévoir des tolérances d'exécution.



Figure 21 : Livraison des portiques au Laboratoire Navier

Dans la Figure 21, on peut voir l'arrivée des portiques au laboratoire Navier. Dans cette image, on peut voir le système en bois qu'il était mis pour assurer la manutention des portiques.

Finalement, les portiques sont prêts pour la première phase des essais au laboratoire Navier, qui consiste à charger les portiques jusqu'à l'ELS, pour simuler l'usage de ces portiques.

A la date de rédaction de ce rapport, on a fait les essais non-destructives pour le portique 1, qui possède des zones de clavetage en C25, voir l'annexe 3. On présentera quelques images de la réalisation de ces essais.

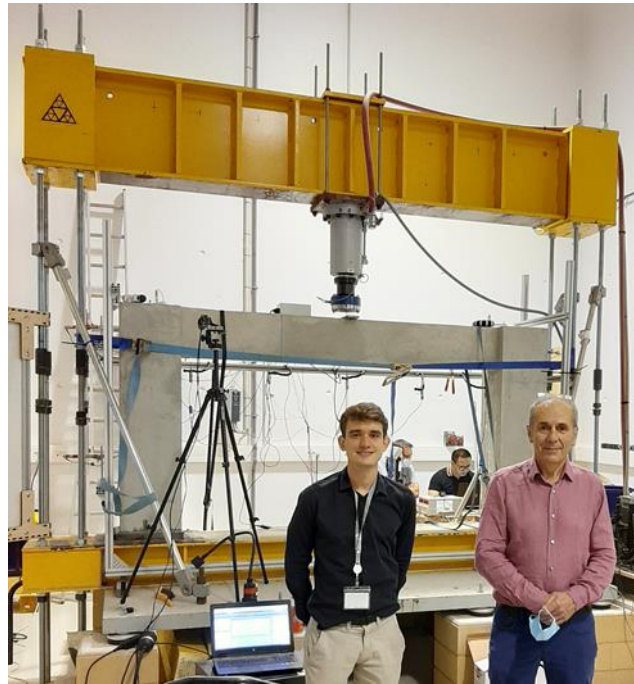


Figure 22 : Portique 1 avant les essais non-destructifs

Dans la Figure 22, on peut voir le portique prêt avant la réalisation des essais. Dans cette image, on peut voir la presse de du laboratoire Navier, notamment, le vérin placé à mi-travée du portique.

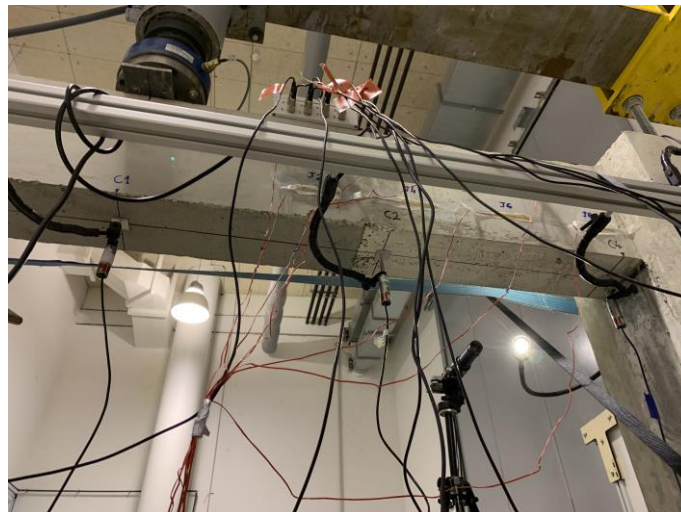


Figure 23 : Système de capture d'image et de déplacements

La Figure 23 montre le système utilisé pour prise en vidéo, qui permettra d'analyser la rotation des zones de clavetage. Dans cette image on peut voir aussi les jauges de placement et les jauges de contraintes, qui vont fournir les valeurs de contraintes de déplacement.



Figure 24 : Zone de fissuration à mi-travée

Dans la Figure 24 , on peut voir les marques en crai rouge, qui indiquent les zones de fissuration de la poutre, c'est-à-dire la zone où on a trouvé de petites fissures au moment de l'application de la charge ELS. En effet, on s'attend à l'apparition de fissures, qui vont caractériser l'arrivée à l'ELS.

Jusqu'au moment de la rédaction de ce rapport, il n'a pas été possible de faire une conclusion précise des résultats. Toutefois, les résultats obtenus avec les essais non-destructives du portique 1 sont très positif, parce qu'ils ont validé les résultats théoriques et la méthodologie de réalisation des essais.

5. La raideur des assemblages réemployables vis-à-vis des efforts horizontaux

Dans ce chapitre, on va aborder l'étude du contreventement d'une tour « fictive » dérivée de la tour Majunga à La Défense. Cette étude va faciliter l'interprétation des résultats des essais des portiques, car avec cette étude on pourrait interpréter mieux les résultats des essais, notamment, les raideurs des assemblages.

5.1 Description du modèle

Le modèle fait sur Pythagore vise à calculer d'une façon simplifiée l'effet des assemblages (poutre-poteau) dans le calcul du contreventement d'une tour. Pour illustrer ce comportement, on a utilisé le projet de la tour Majunga.



Figure 25 : Tour Majunga

Pour modéliser les assemblages poutre-poteaux, on a fait deux études :

- **La première étude est basée sur l'hypothèse que les assemblages (zones de clavetage) ont un module de Young moins important que le reste de la poutre. Dans cette étude, on va faire varier les modules de Young des assemblages, l'inertie du noyau et la hauteur de la tour.**
- **La deuxième étude consiste en considérer que les assemblages sont des ressorts. Dans cette étude, on va faire varier les inerties des ressorts et la hauteur de la tour pour le cas sans noyau.**

5.2 Etude de l'impact de la variation du module d'Young des assemblages

Sur Pythagore, on va modéliser la moitié de la tour, c'est-à-dire on ne considérera que les poteaux d'une façade avec ses poutres. Dans cette approche, on va modéliser le noyau par une poutre de section variable, qui représentera la moitié de l'inertie du noyau de la tour. Le noyau sera relié par un ressort, dont on fait varier leur raideur pour caler le modèle simplifié avec les résultats du modèle 3D. Dans l'image ci-dessous, le noyau est représenté en violet, les poutres en orange, les poteaux en bleu et les ressorts en vert.

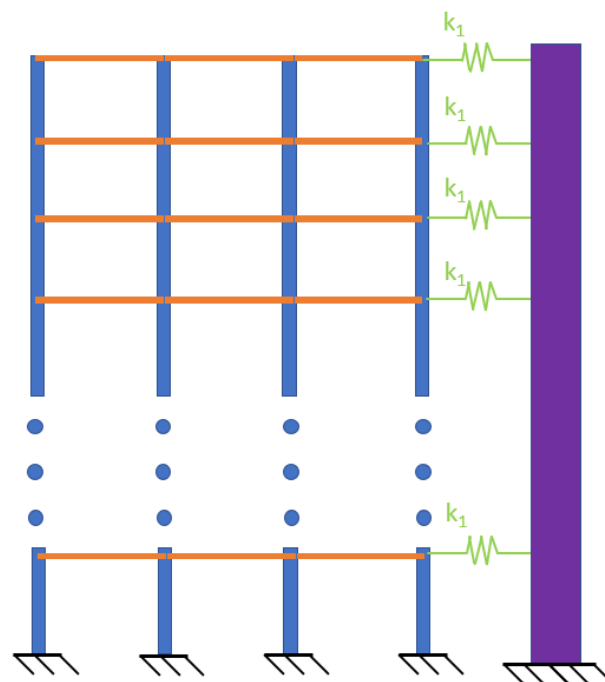


Figure 26 : Modèle RdM Simplifié de la tour Majunga

- Type de béton :

Dans ce modèle, on utilise un béton avec une résistance caractéristique F_{ck} de 20 MPa, qui donne un module de Young de 30 GPa avec un coefficient de poisson de 0,2.

- L’inertie du noyau :

Tableau 8 : Inertie quadratique du Noyau

Infrastructure	3808 m ⁴
Batterie basse	3038 m ⁴
Batterie moyenne	2955 m ⁴
Batterie haute	2017 m ⁴

Dans ce modèle simplifié le noyau est modélisé comme un poteau rectangulaire de section L, telle que :

$$I = B * \frac{H^3}{12} \Rightarrow I = \frac{L^4}{12} \Rightarrow L = \sqrt[4]{12 * I}$$

Comme dans ce modèle, on fait le calcul pour la moitié de la tour, on considère :

$$L = \sqrt[4]{6 * I}$$

Les valeurs de L sont :

Tableau 9 : Valeurs des longueurs équivalents pour le Noyau

Infrastructure	12,29 m
Batterie basse	11,62 m
Batterie moyenne	11,54 m
Batterie haute	10,49 m

Pour caler les résultats, on a fait varier le module de Young de la barre qui relie la grille de façade à la poutre qui représente le noyau pour trouver la même valeur de déplacement que le modèle 3D. Les caractéristiques de ces poutres sont : longueur de 10m, section carrée de 1m, module de Young de 0.137 GPa. En effet, cette barre va représenter le ressort avec une inertie de 13,7 MN/m.

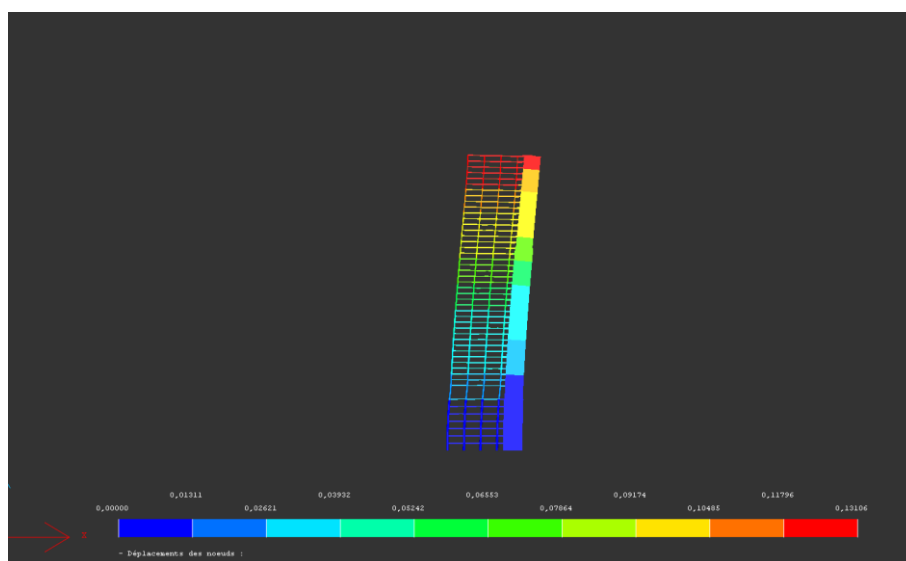


Figure 27 : Déformée de la grille de façade sous un chargement horizontal

Avec ces approximations on trouve un déplacement de 13,106 cm, pour le cas d’un chargement de vent de 1.70 kPa. Dans le modèle 3D, le déplacement était de 13.108 cm.

Pour modéliser les assemblages, on a divisé les poutres entre trois parties. Les parties en orange, ils représentent les zones d'assemblage (Zones avec une raideur réduite). La partie en Bleu, c’est la zone courante (on garde les caractéristiques du béton). La figure ci-dessous représente la poutre courante de cette tour

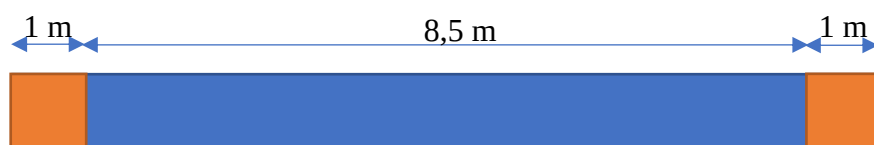


Figure 28 : Schéma de modélisation des poutres

On a fait varier les raideurs des assemblages pour voir le comportement de la tour. Ci-dessous un tableau qui synthétise les résultats :

Tableau 10 : Déplacement max en fonction du module des assemblages

Module de Young assemblage (GPa)	Déplacement max de la tour (cm)
30	13.106
15	13.312
3	13.882
0.3	14.795

Dans le cas des assemblages réemployables, on doit avoir un module de Young entre 30 et 15 GPa (Déjà un béton avec un module de Young de 15 MPa est beaucoup trop défavorable). L'analyse du module de Young des assemblages va permettre d'analyser l'influence d'une possible réduction de ce paramètre dû à la réalisation des assemblages réversibles. Il sera également possible d'étudier l'influence du noyau central dans le contreventement de cette tour.

- **Etude du contreventement de la Tour Majunga pour les cas de 10, 15 et 20 étages**

Dans cette approche, on va étudier l'impact du nombre d'étages de la tour. En parallèle, on va faire varier l'inertie du noyau. Dans le cas de la Tour Majunga, on a considéré les mêmes configurations des poteaux, pour les cas : tour de 20 étages ; tour de 15 étages ; tour de 10 étages. Les figures ci-dessous montrent les résultats des déplacements pour plusieurs cas d'inertie de noyau.

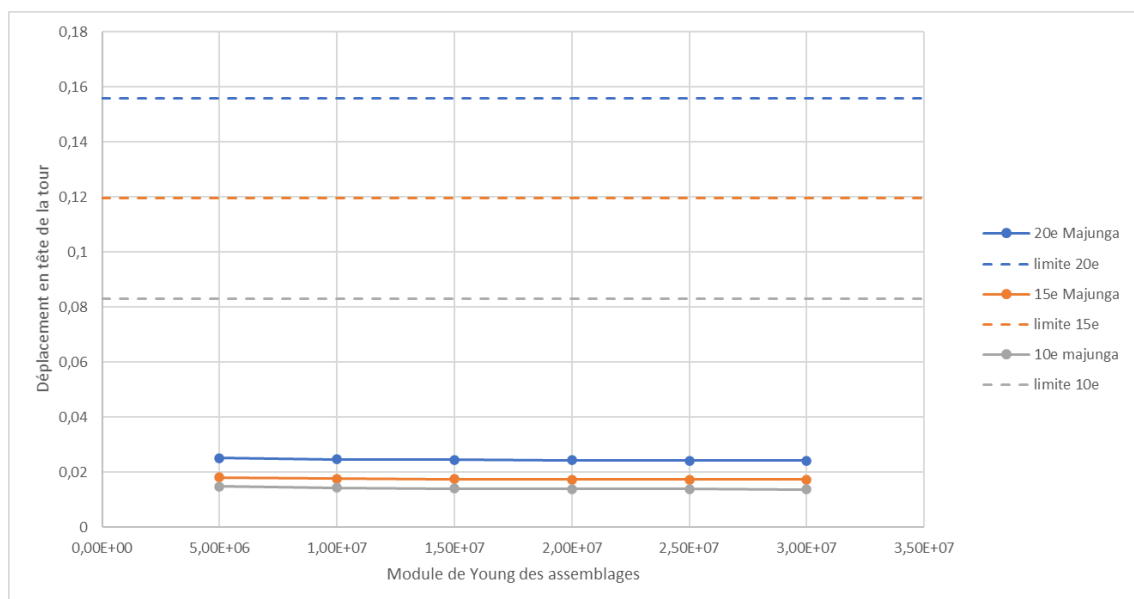


Figure 29: Déplacements en tête avec 100% du Noyau

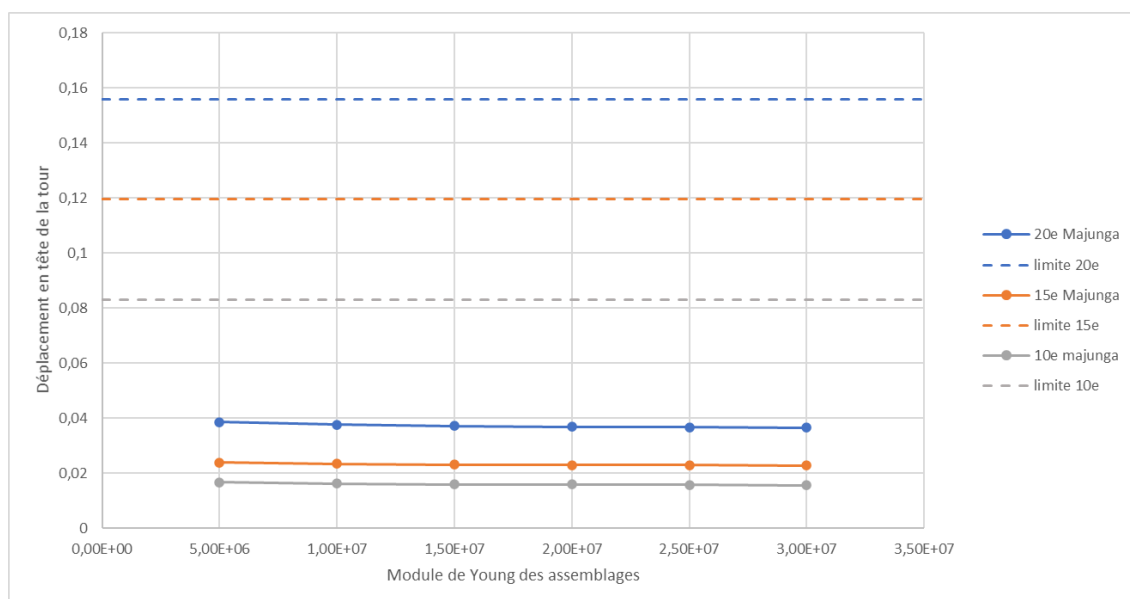


Figure 30 : Déplacements en tête avec 50% du Noyau

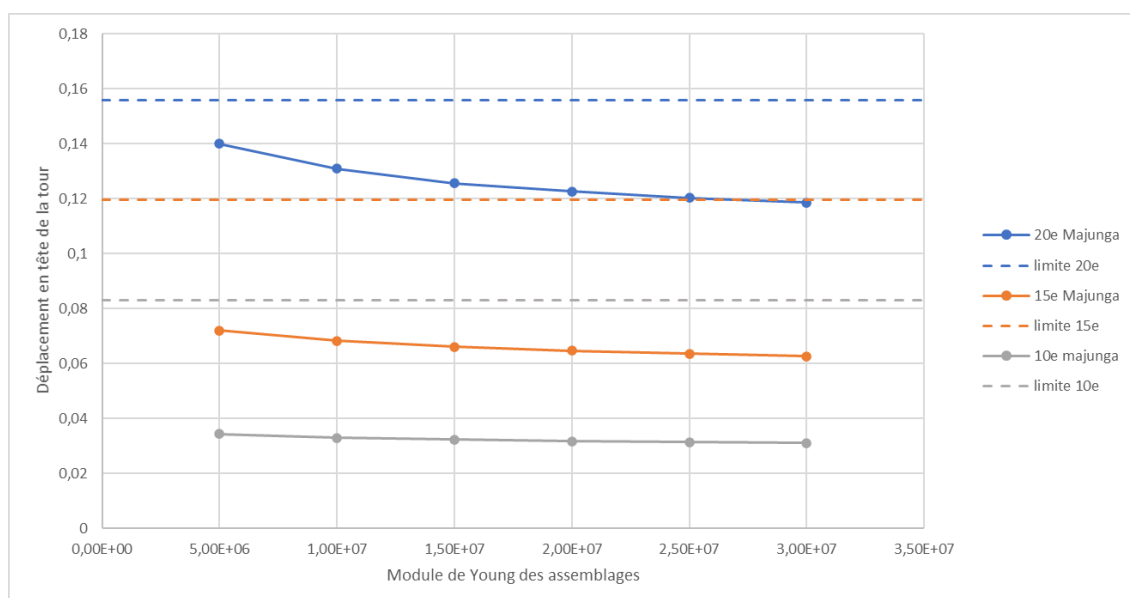


Figure 31 : Déplacements en tête avec 10% du Noyau

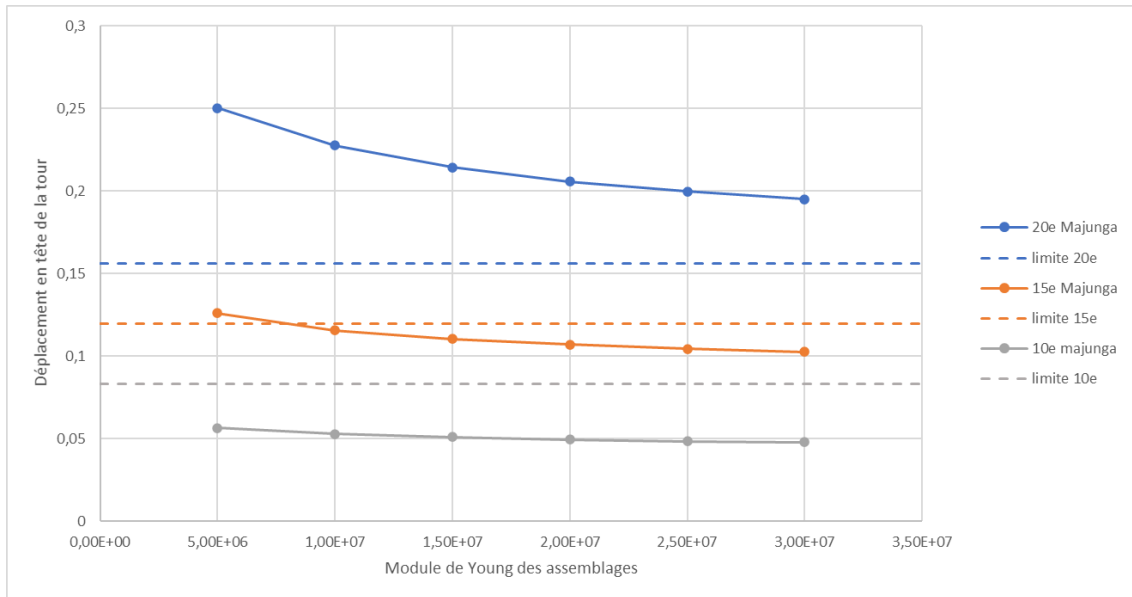


Figure 32 : Déplacements en tête avec 5% du Noyau

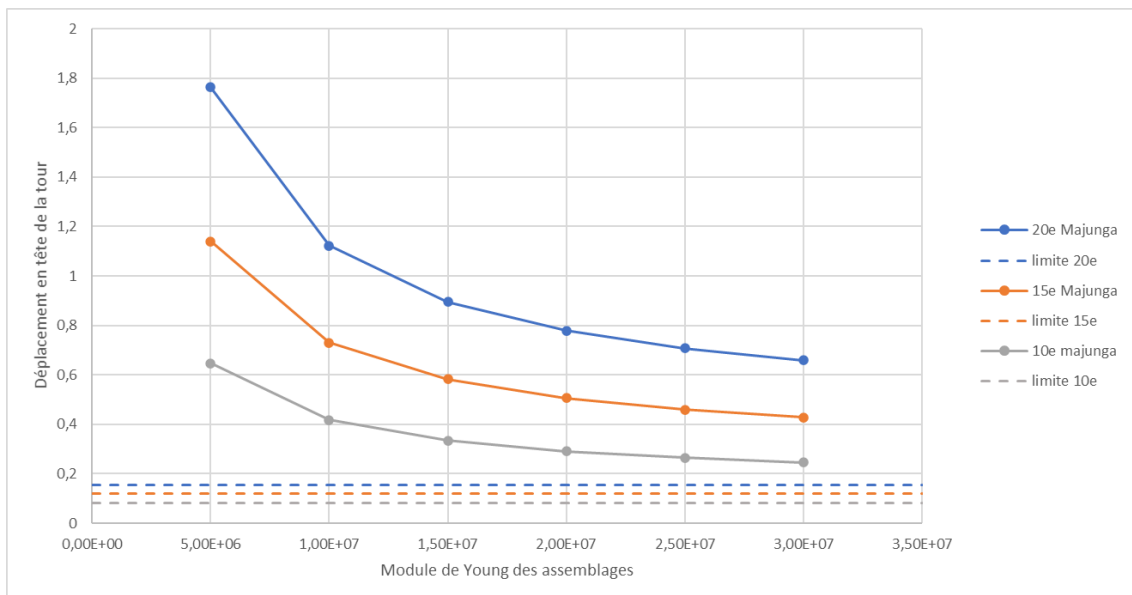


Figure 33 : Déplacements en tête sans Noyau

• **Conclusion de la première étude :**

- Avec la géométrie actuelle des poutres et poteaux, on a conclu que le noyau est très important pour assurer le respect de la limite de déplacement en tête de tour. Dans le cas que l'on n'a pas de noyau, on ne respecte pas les critères de déplacement.
- Pour le cas où le module de Young est réduit par la moitié, on trouve une augmentation du déplacement de la tour autour de 35% (Pour le cas sans noyau)

5.3 Etude de l'impact de la raideur des assemblages sur le contreventement

Le deuxième modèle consiste d'analyser l'impact de la variation des assemblages en termes de la raideur de rotation des assemblages. Dans ce cas, les assemblages sont modélisés avec des liaisons entre les poutres et les assemblages. Le schéma ci-dessous montre la poutre avec le ressort à la place des liaisons entre la poutre et les poteaux :

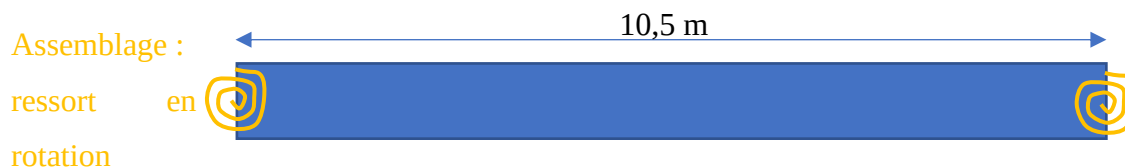


Figure 34 : Schéma de modélisation des poutres avec des ressorts

D'abord, on veut déterminer les ordres des grandeurs des raideur dans laquelle le comportement change d'encastrement à rotulé. Pour faire cette première analyse, on a décuplé les valeurs de raideur. Les tableaux ci-dessous montrent les valeurs pour le cas de la tour Majunga avec 10 étages, 15 étages et 20 étages.

Raideur des assemblages (kN.m/rad)	Déplacement en tête	Variation du déplacement
0,00E+00	8,56704	
1,75E-01	8,55277	0%
1,75E+00	8,42678	1%
1,75E+01	7,36720	14%
1,75E+02	3,60570	104%
1,75E+03	0,97105	271%
1,75E+04	0,34148	184%
1,75E+05	0,25589	33%
1,75E+06	0,24685	4%
1,75E+07	0,24594	0%
1,75E+08	0,24585	0%

Figure 35 : Déplacement en tête de la tour : cas 10 étages

Raideur des assemblages (kN.m/rad)	Déplacement en tête	Variation du déplacement
0,00E+00	25,15000	
1,75E-01	25,07000	0%
1,75E+00	24,38000	3%
1,75E+01	19,27000	27%
1,75E+02	7,25617	166%
1,75E+03	1,71678	323%
1,75E+04	0,59149	190%
1,75E+05	0,44477	33%
1,75E+06	0,42938	4%
1,75E+07	0,42784	0%
1,75E+08	0,42768	0%

Figure 36 : Déplacement en tête de la tour : cas 15 étages

Raideur des assemblages (kN.m/rad)	Déplacement en tête	Variation du déplacement
0,00E+00	59,64000	
1,75E-01	59,34000	1%
1,75E+00	56,72000	5%
1,75E+01	39,89000	42%
1,75E+02	12,25000	226%
1,75E+03	2,65598	361%
1,75E+04	0,90621	193%
1,75E+05	0,68476	32%
1,75E+06	0,66164	3%
1,75E+07	0,65932	0%
1,75E+08	0,65909	0%

Figure 37 : Déplacement en tête de la tour : cas 20 étages

On peut constater qu'entre les valeurs de $1,75 \cdot 10^2$ kN.m/rad et $1,75 \cdot 10^4$ kN.m/rad, on trouve la variation la plus importante de déplacement. Pour les analyses suivantes on utilisera une répartition plus raffinée pour la valeur des raideurs entre les valeurs de sensibilité pour faire le graphique de la Figure 38, qui montre la valeur de la déformée en fonction de la raideur des assemblages.

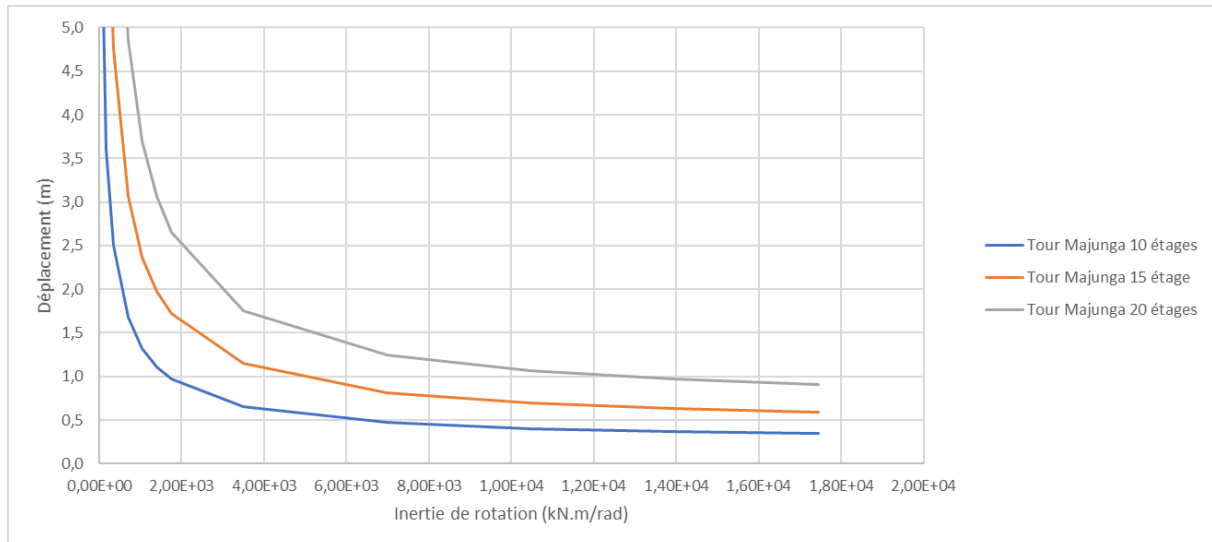


Figure 38 : Déplacement en tête en fonction de l'inertie de rotation

- Conclusions :

Avec cette étude, on peut conclure que :

- Pour les raideurs de rotation inférieure à $1,75 \cdot 10^2$ kN.m/rad, on est plus proche du cas rotulé.
- Pour les raideurs de rotation entre $1,75 \cdot 10^2$ kN.m/rad et $1,75 \cdot 10^4$ kN.m/rad les assemblages sont mieux représentés par des ressorts.
- Pour les raideurs de rotation supérieure à $1,75 \cdot 10^4$ kN.m/rad, les assemblages sont plutôt des encastrement.
- Les calculs montrent que le contreventement est très sensible à la hauteur de la tour.
- La géométrie de la grille de façade est très importante pour le calcul de la résistance de la tour aux efforts horizontaux.
- La grille de façade avec des portées plus importantes ont un comportement plus proche du comportement d'un portique. Lorsque la hauteur de la tour est plus importante, les déformés dues à l'effort tranchant dans les éléments sont plus importants.
- La géométrie de la grille de façade de la tour Majunga ne semble pas adaptée pour résister aux efforts horizontaux sans la participation d'un noyau dans le contreventement.

Les principales conclusions sont que la géométrie de la grille de façade est très importante pour assurer le contreventement de la tour et les déplacements en tête de la tour sont très sensibles au nombre d'étages. Finalement, on a pu déterminer une méthode de trouver une fourchette de valeur pour analyser le comportement des assemblages, pour le cas d'une tour sans noyau. Cette méthode simplifiée sera utile pour analyser les résultats des essais des portiques.

6. Outil de réemploi d’éléments en béton armé

Dans ce chapitre, on va aborder une méthode qui a été développée pour optimiser le réemploi d’éléments en béton armé. L’outil développé ici a été inspiré par l’outil conçu par ALEXAN Cristina [2] pendant son PFE chez Setec TPI, qui a utilisé des maquettes Revit, pour créer un stock d’éléments en acier pour ensuite les appliquer dans un nouveau projet à l’aide d’un logicielle des éléments finis.

L’approche utilisée ici pour développer cet outil est beaucoup plus simple et vise à réemployer les éléments en béton armé : il s’agit de déterminer l’utilisation optimale d’un stock d’éléments issus de la déconstruction d’un bâtiment, en vue de leur réemploi dans une nouvelle construction.

En premier lieu, on a décidé de prendre en compte seulement les éléments verticaux, c’est-à-dire les poteaux de la structure. L’outil consiste à faire un code sur Excel VBA, qui prend une base de données d’entrée – dans ce cas – les dimensions des poteaux et les caractéristiques du béton d’une structure existant. Ensuite, on prend la descente de charge fait en phase APS pour donner le besoin en termes de charges.

La motivation initiale pour faire cet outil c’est de trouver rapidement quelques pistes de conception en appliquant cet outil dans quelques projets existants. Pour les données de sortie, l’outil montre le gain de poids de la structure, le poids de chutes des éléments, le pourcentage des éléments utilisés de la base de données, le pourcentage des éléments réemployés.

6.1 Méthodologie d’outil

Le logigramme ci-dessous montre le fonctionnement de l’outil d’optimisation.

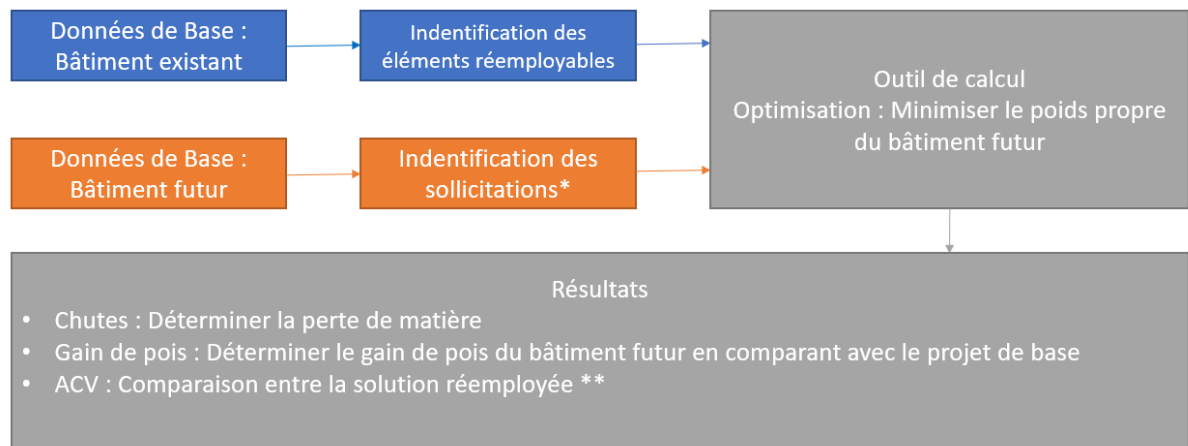


Figure 39 : Logigramme simplifié de l’outil de réemploi

Obs. : L’analyse AVC sera possible après la réalisation des essais des portiques, qui donneront les données nécessaires pour faire ce calcul.

6.1.1 Données d’entrée bâtiment futur

L’outil utilise comme données d’entrée les descentes des charges en phase APS, pour donner les demandes des charges, c’est-à-dire les demandes des charges du bâtiment qui sera fait avec des éléments réemployés. Les descentes des charges sont décrites en combinaison des charges à ELS et à ELU.

6.1.2 Données d’entrée bâtiment existant

Pour déterminer la base de données, on utilise juste la géométrie des éléments. Dans ce cas, on pourrait utiliser comme base de données les maquettes Revit des bâtiments, ou simplement des informations permettant de déterminer la géométrie des éléments, comme par exemple les propositions des sections de la phase APS.

6.1.3 Equivalence des sections

L'outil consiste en utiliser un calcul simplifié pour donner une section équivalente entre les bases de données. Avec cette section équivalente, on essaie de trouver un élément de la base de données qui possède une longueur plus importante et que possède au moins la même surface en termes de section. Dans ce cas, pour simplifier les calculs, on a fait l'hypothèse que tous les éléments verticaux possèdent le ratio minimal d'acier, et on a considéré un critère qu'assure la résistance à la compression simple et au flambement des éléments, ce critère dépend du type de béton et de la géométrie des éléments (Pour simplifier, on a pris un critère que respecte les cas courants de chaque tour).

6.1.4 Analyse des résultats

Pour analyser la qualité des solutions de l'outil, on va analyser les paramètres suivants :

- **Le gain de poids de la structure :** Le calcul du gain de poids consiste à déterminer combien de poids la structure réemploie. Dans ce cas on calcule la différence entre le poids de la structure réemploie et de la structure optimisée, c'est-à-dire la structure avec le minimum possible de section même si dans la réalité les éléments ont toujours une marge.
- **Chute :** On calcule le poids des chutes des éléments, c'est-à-dire le poids des éléments découpés que ne sont pas utilisés.
- **Eléments réemployés :** On détermine le pourcentage de la nouvelle structure qui peut être fait avec des éléments réemploies.
- **Eléments utilisés :** On détermine le pourcentage de la base de données qui a été utilisé.

Avec ces paramètres on a décidé de faire une optimisation, qui permettra de maximiser le nombre d'éléments réemployés avec le minimum de gain de poids de la structure.

6.2 Résultats obtenus

Dans un premier temps on a utilisé l'outil pour analyser la possibilité de réemployer les éléments des projets existants, notamment, des projets dont Setec a participé à la conception. Par exemple, on a utilisé les projets : Tour Majunga, Tour Triangle, THE-LINK, Village Olympique, que sont des projets très récent, ce qui donne un aperçu très actuel des IGHs.

- Tour Majunga

La tour Majunga c'est une tour de 45 étages située à la Défense construite en 2014 [16]. Les verticaux de cette tour sont des poteaux rectangulaires fait avec des bétons à haute performance. La hauteur courante des étages est de 3.41 m. La tour est un immeuble de bureaux. L'image ci-dessous montre la disposition des poteaux de cette tour.

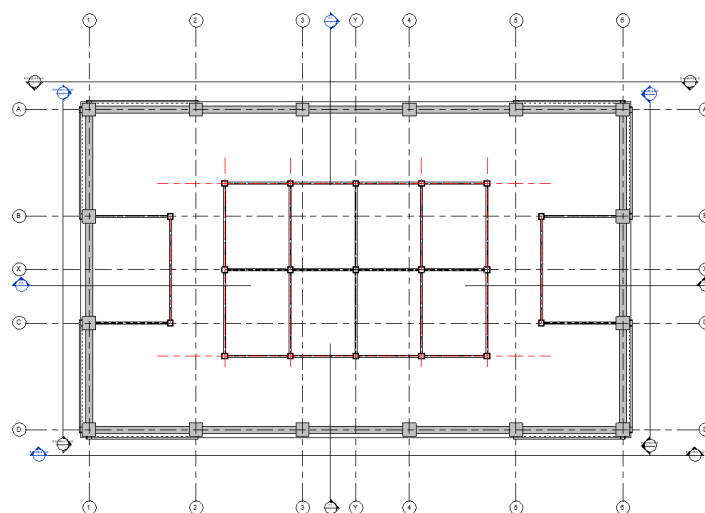


Figure 40 : Etage courant Tour Majunga

Obs. : Pour le cas de la tour Majunga, on déduit les descentes de charges, en effet on est se basé sur une Maquette Revit qui a fourni les dimensions des éléments.

- Tour Triangle

La tour triangle c'est une tour que sera localisé dans le 15^e arrondissement de Paris, situé au parc des expositions de la porte de Versailles. L'immeuble possède une forme particulière d'une

pyramide avec 180 m de hauteur et 42 étages. Les éléments verticaux de la façade de cette tour sont légèrement inclinés. Les étages courants de cette tour font 3.80 m de hauteur. L'image ci-après montre les poteaux de façade inclinés.

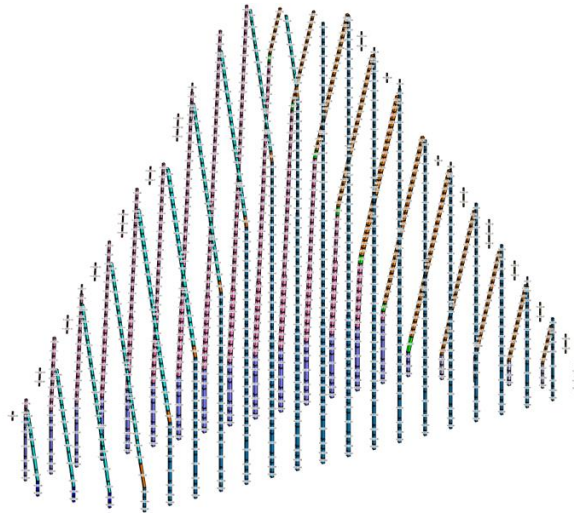


Figure 41 : Repérage des poteaux de façade de la Tour Triangle © Herzog & De Meuron

Obs. : La tour Triangle c'est une tour que possède des poteaux légèrement inclinés, dans l'outil de calcul, les inclinaisons ne sont pas prises en compte, on ne considère que la descente de charge due aux chargements d'exploitation des dalles et au poids propre des éléments.

- THE-LINK

THE-LINK c'est un immeuble qu'est en phase de construction à la Défense. La particularité de ce projet c'est qu'il s'agit de deux ailes que seront reliées par des passerelles. L'immeuble se divise en aile SEINE et aile ARCHE. L'image ci-dessous montre le une coupe de l'aile ARCHE.

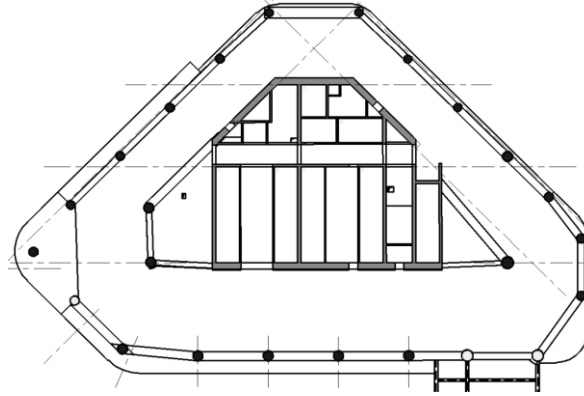


Figure 42 : Coupe Aile Arche - THE LINK © Setec tpi

Pour l’application de l’outil, on ne va considérer que les éléments verticaux de l’Aile Arche.

- Village Olympique

Le Village Olympique est un projet en phase de conception. Le village olympique a comme finalité accueillir les athlètes durant les jeux Olympiques et Paralympiques de 2024 à Paris. L’ensemble du projet est constitué de plusieurs projets. L’image ci-dessous montre une coupe du bâtiment E1-C, qui est l’un des bâtiments du Village Olympique.



Figure 43 : Coupe bâtiment E1-C - Village Olympique

Pour appliquer l’outil, on a décidé d’utiliser les projets deux à deux, en les appliquant une fois comme bâtiment existant (Bâtiment à démonter) et une autre fois comme bâtiment futur (Bâtiment réemployé). De cette façon, on se retrouve avec 12 combinaisons possibles. Les principales informations sur ces bâtiments sont affichées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 : Principales informations sur les projets utilisés

	Usage	Nombre d'étages	Hauteur des étages courants (m)	Critère de dimensionnement (MPa)
Tour Majunga	Bureaux	45	3,41	30
Tour Triangle	Bureaux, hôtellerie, restauration, Centre de conférence	42	3,8	30
THE-LINK	Bureaux	52	3,84	30
Village Olympique	Logement	10	2,94	19

En utilisant ces projets et l'outil de calcul, on a déterminé les pourcentages des éléments réemployés, le tableau ci-dessous fait une synthèse de les résultats trouvées :

Tableau 12 : Pourcentages des éléments réemployés

		Bâtiment réemployé			
		Tour Majunga	Tour Triangle	THE-LINK	Village Olympique
Base d'éléments	Tour Majunga	X	26,08%	8,26%	78,40%
	Tour Triangle	28,39%	X	9,46%	96,60%
	THE-LINK	27,08%	80,64%	X	88,27%
	Village Olympique	0,00%	8,26%	3,18%	X

Le Tableau 12 montre qu'il n'était pas possible de réemployer les éléments verticaux du Village Olympique dans le projet de la Tour Majunga, cela est dû à une incompatibilité entre ces deux projets. Une autre observation très intéressante c'est le réemploi de THE-LINK dans le projet de la tour Triangle, car on arrive à réemployer 80.64% des éléments de la tour Triangle, mais l'inverse n'est pas valide. Finalement, on peut voir la tendance entre deux projets, si l'un est facilement réemployable par l'autre, l'inverse n'est pas valide.

Le tableau ci-dessous montre les pourcentages d’utilisation des éléments de la base de données.

Tableau 13 : Pourcentages des éléments utilisées de la base de données

		Bâtiment réemployé			
		Tour Majunga	Tour Triangle	THE-LINK	Village Olympique
Base d'éléments	Tour Majunga	X	60,68%	16,67%	37,24%
	Tour Triangle	12,76%	X	7,92%	18,17%
	THE-LINK	15,82%	100,00%	X	21,19%
	Village Olympique	0,00%	47,22%	16,67%	X

Concernant les chutes des éléments, on peut déterminer le tableau ci-dessous :

Tableau 14 : Chutes des éléments réemployée

		Bâtiment réemployé			
		Tour Majunga	Tour Triangle	THE-LINK	Village Olympique
Base d'éléments	Tour Majunga	X	22%	18%	24%
	Tour Triangle	16%	X	28%	27%
	THE-LINK	14%	14%	X	34%
	Village Olympique	-	16%	20%	X

Le Tableau 14 montre que les chutes des éléments sont toujours autour de 20%. On constate aussi une augmentation des chutes dans les pour le cas du Village Olympique, l’une des principales explications pour ce augmentation des chutes est la différence entre la longueur des éléments.

Finalement on va avaliser le gain de poids pour chaque solution étudiée.

Tableau 15 : Gain des poids des solutions analysées

		Bâtiment réemployé			
		Tour Majunga	Tour Triangle	THE-LINK	Village Olympique
Base d'éléments	Tour Majunga	X	65%	82%	71%
	Tour Triangle	14%	X	69%	61%
	THE-LINK	10%	65%	X	59%
	Village Olympique	-	46%	74%	X

Le Tableau 15 montre les gains de poids pour les solutions calculées. On remarque que les gains de poids sont très expressifs, mais il faut tenir en compte que le calcul du gain de poids est fait en considérant la différence de poids entre l'élément avec la section minimale et l'élément réemploie.

Les principales conclusions qu'on peut observer avec l'utilisation de cet outil sont :

- **Il faut des cohérences au niveau des charges, par exemple les deux bâtiments doivent avoir une descente de charges du même ordre de grandeur (de manière à ne pas avoir à utiliser un stock d'éléments sous-dimensionnés ou surdimensionnés).**
- **Globalement on doit avoir une marge en termes de longueurs des éléments. Dans ce cas, il faut penser à utiliser des projets avec des hauteurs différentes, comme par exemple : utiliser les éléments d'un bâtiment à usage bureaux dans un autre bâtiment à usage logement.**
- **Cette étude montre qu'il est très difficile de réemployer deux projets très différents, idéalement, il faut réfléchir dans dès la phase de conception pour pouvoir mieux utiliser les éléments de la base de données.**

Pour les prochaines études, on suggère les améliorations suivantes de l'outil de calcul :

- L'intégrer les quantités réelles d'acier ou mieux les barres d'acier avec leurs positions. L'hypothèse que les éléments ont les quantités minimales d'acier peut conduire à sous-estimer les résistances des éléments.
- Il faut mettre en place une optimisation pour réduire le changement de sections des éléments au long d'un poteau. De cette façon, on privilégiera la continuité des sections au long d'un élément.
- Intégrer les éléments horizontaux dans l'outil de calcul. Cette amélioration augmentera considérablement la complexité de l'outil, car dans ce cas il faut considérer les efforts fléchissant sur les éléments et les orientations des éléments dans l'espace.
- Le langage Excel VBA s'est avéré un peu inefficace, car en fonction des bases de données les calculs sont devenus très lents. Par conséquent, dans un cas d'un calcul plus

complexe on suggère d'utiliser un langage plus adapté pour faire ce type d'optimisation, comme par exemple : Java, C++/C, Python.

- Il serait très intéressant d'intégrer un calcul d'analyse de cycle de vie. Pour le moment, on attend les résultats des essais au laboratoire Navier avec les portiques en échelle réduite pour confirmer les données nécessaires pour faire le calcul AVC.

Finalement, cette étude a donné quelques pistes pour optimiser le réemploi des éléments verticaux en béton armé. L'outil s'est avéré très efficace pour le calcul du réemploi des éléments verticaux, ce qui montre qu'il serait intéressant de développer encore plus l'outil.

Conclusion

Le scénario mondial actuel indique que le secteur de la construction civile va croître dans les années à venir. Compte tenu des impacts environnementaux causés, actuellement, par ce secteur, il appartient aux ingénieurs et architectes de réfléchir à des alternatives pour contourner ce problème. Dans cet esprit, le travail présenté dans ce mémoire vise à étudier une possible solution pour réduire ces impacts : la conception des bâtiments en vue de leur déconstruction.

La principale problématique de ce rapport concerne le réemploi des éléments en béton armé. Dans un premier temps, on a étudié le comportement des portiques que seront testées au laboratoire Navier. On a pu déterminer avec des modèles Pythagore les raideurs des assemblages, les efforts limites et, notamment, des consignes pour la bonne réalisation des essais.

En deuxième lieu, on a étudié l’impact des assemblages déconstructibles en utilisant le projet de la tour Majunga. L’étude a aidé à comprendre l’impact sur le contreventement des assemblages réemployables. Cela conduit à déterminer des fourchettes de valeurs pour lesquels on constate le changement de comportement entre rotulé et encasturé. Ces valeurs seront utiles pour analyser les résultats des essais.

Finalement, un outil sur Excel VBA a été développé pour faire le réemploi des éléments verticaux. On a utilisé comme donné d’entrée de cet outil quelques projets existants dont Setec a participé à la conception. Les résultats obtenus étaient très fructueux, car on a pu déterminer quelques pistes pour concevoir avec le réemploi des éléments.

Pour conclure, les modèles théoriques montrent que la solution de réemployer les éléments peut être applicable, mais il faut encore des études pour développer plus cette méthode. Ce qui motive aussi la réalisation des essais que seront fondamentaux pour franchir un nouvel étage vers le réemploi des éléments. Dernièrement, cette étude montre l’intérêt de développer encore plus le réemploi, car à l’avenir, il peut nous aider à faire face aux enjeux climatiques.

Bibliographie

1 AFNOR : NF EN 1992-1-1 Eurocode 2 partie 1-1 : Calcul des structures en béton. Règles générales et règles pour les bâtiments

2 ALEXAN, Cristina. Éco-construction : Réemploi d'éléments structuraux. Mémoire de Projet Fin d'études : Elève ingénieure en Double Diplôme. Champs-sur-Marne : École Nationale des Ponts et chaussées, 2019, 139p.

3 Alliance HQC. L'économie circulaire, Tremplin du bâtiment durable pour tous. Date de création janvier 2018. Document disponible sur <<http://www.hqegbc.org/wp-content/uploads/2018/01/CadreEcoCircuBat-web-ok.pdf>> (consulté le 26.06.2020)

4 Architecture of the Games, London 2012 ; Transformation Olympic Stadium(6) – Construction New Roof Begins, date de mise à jour 03.09.2014 . Disponible sur <<https://architectureofthegames.net/2012-london/london-2012-transformation-olympic-stadium-6-construction-new-roof-begins/>> (consulté le 16.06.2020).

5 BERTIN, Ingrid. Construire, déconstruire, anticiper le réemploi des matériaux : une possible réversibilité des bâtiments, thèse en préparation chez Setec TPI et au sein d'Ecole des Ponts ParisTech (Laboratoire Navier), sous la direction de Robert Le Roy , (2017-2020).

6 BOIS, Les grandes techniques de la construction en bois. Disponible sur <<https://www.bois.com/maison/construction/les-grandes-techniques-de-la-construction-bois>> (consulté le 16.06.2020)

7 BORRITS, Charlotte. Conception bas carbone et assemblages réversibles. Mémoire de Projet Fin d'études : Elève ingénieur. Champs-sur-Marne : École Nationale des Ponts et chaussées, 2019, 141p.

8 BRÜTTING, Jan, DE WOLF, Catherine, FIVET, Corentin. The reuse of load-bearing components, 2019

9 BRÜTTING, Jan, SENATORE, Gennaro, FIVET, Corentin. Optimization Formulation for the Desing of Low Embodied Energy Structures Made from Reused Elements, 2018.

10 Code de l’environnement, Article L541-1-1, créé par Ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010 - art. 2. Document disponible sur <<https://www.legifrance.gouv.fr>> (consulté le 29.06.2020)

11 Documentation de Pythagore, 6. Module CARA : Caractéristiques géométriques et matérielles de section épaisse. Disponible sur <file:///C:/Pythagore_v20.03/DOC/documentation_utilisateur/CARA.html> (consulté le 24.06.2020)

12 FFB, Déchets du bâtiment : Savoir de quoi on parle, date de mise à jour 11.07.2019. Disponible sur <https://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/laffb/salle_de_presse/communiqués_de_presse/dechets-du-batiment-savoir-de-quoi-on-parle.html> (consulté le 11.07.2020)

13 LE FIGARO, Entreprise Setec Travaux Publics Et Industriels - Setec-Tpi à Paris (75012), date de mise à jour 07.06.2020. Disponible sur <<http://entreprises.lefigaro.fr/setec-travaux-publics-et-industriels-setec-tpi-75/entreprise-672038288>> (consulté le 10.06.2020)

14 MOREAU, Sylvain, Chiffres clés du climat – France, Europe et Monde, Commissariat général au développement durable - Edition 2019 p.6

15 OLDFIELD P., The Sustainable Tall Building, Routledge, 2019, New-York, p 5 et p 181

16 Paris la Defense, Majunga. Disponible sur <<https://parisladefense.com/fr/decouvrir/tours/majunga>> (consulté le 22.06.2020)

17 POMPONI, Francesco, DE Wolf , Catherine. Embodied Carbon in Buildings: Measurement, Management, and Mitigation : Springer, 2018 272-275p.

18 Projet Maine-Montparnasse, Disponible sur <<https://www.mairie14.paris.fr/mes-demarches/urbanisme/les-projets-urbains/projet-main-montparnasse-563>> (Consulté le 24.06.2020)

19 SETEC, Eco-conception, 2019, date de mise à jour inconnue. Disponible sur <<https://www.setec.fr/groupe/lessentiel>> (consulté le 11.06.2020).

20 SETEC, L’essentiel, 2016, date de mise à jour inconnue. Disponible sur <<https://www.setec.fr/groupe/lessentiel>> (consulté le 10.06.2020).

21 SNBPE, Déclaration Environnementale Produit. Date de création

22 Tour Montparnasse, La nouvelle tour Montparnasse, Le grand projet de rénovation. Disponible sur <<https://www.tour-montparnasse.fr/renovation/>> (consulté le 24.06.2020)

23 Viguié. Tour Aurore, La Défense. Date de création inconnue. Document disponible sur <<https://www.viguié.com/fr/projets/tour-aurore-courbevoie>> (consulté le 29.06.2020)

Annexes

Annexe 1 : Calcul solution optimisée pour les émissions de CO₂ : Village Olympique

Dans cette annexe on va aborder la démarche calculatoire utilisé pour déterminer la solution optimale pour réduire les émissions de CO₂. Cette démarche a été utilisé dans la phase APS du Village Olympique, qui est un projet avec fort engagement environnemental.

Le principe de la démarche consiste en analyser plusieurs combinaisons de types de béton pour trouver lequel a le plus faible impact carbone. Dans le cas du village Olympique, on a utilisé le béton du type VERTUA, qui sont des bétons à impact carbone réduit, c'est-à-dire ils ont moins d'émissions de CO₂ par m³ associé dans sa production.

Globalement, les bétons avec une résistance plus importantes utilisent plus de ciment dans sa formulation, cela justifie que les bétons plus performants sont les bétons qu'ont plus d'émissions de CO₂ par m³, ce qui reste valable pour les bétons à faible impact carbone. En revanche, pour avoir la même résistance, les bétons de plus faibles résistances utilisent des sections plus importantes, ce qui conduit à utiliser plus de béton. De ce fait on doit analyser quelle est la meilleure combinaison des types de béton pour avoir une structure avec le moins d'impact carbone.

Pour illustrer cette démarche, on va utiliser le cas du bâtiment E1-C (Figure 43). Pour la détermination des sections de poteaux de ce bâtiment, on a fait l'hypothèse que les poteaux ont les quantités minimales d'acier. Le bâtiment E1-C est un bâtiment avec 27 éléments verticaux, qui ont été divisé en 3 groupes en fonction des valeurs des charges appliqués. Le premier groupe de poteaux possède 5 éléments, qui sont les éléments verticaux qui correspondent aux éléments de la façade sud.

Le bâtiment E1-C est un bâtiment R+10 avec les sections des poteaux constantes entre les niveaux R+10 à R+7, R+6 à R+4 et R+3 à R+1. De cette façon on a trois sections de poteaux dans laquelle les éléments verticaux possèdent la même section. Dans cette phase du projet, on a fait le dimensionnement des éléments avec les vérifications de résistance à la compression simple et au flambement.

Pour exemplifier la démarche utilisée, on va présenter trois propositions de types de bétons pour ce groupe de 5 poteaux :

- Proposition 1 :

Si l'on utilise du C25 sur toute la longueur du poteau, on trouvera un bilan carbone de 685,98 kg par poteau. Les valeurs sont affichées dans le tableau ci-dessous.

	Haut poteau	Bas poteau	Section (cm)	Type de béton	Volume poteau (m3)	Bilan carbone (kg)
Type 1	R+10	R+7	35x35	C25	1,64	184,63
Type 2	R+6	R+4	45x45	C25	1,79	201,04
Type 3	R+3	R+1	55x55	C25	2,67	300,32

685,98

- Proposition 2 :

Si l'on utilise du C40 en batterie haute, du C50 en batterie moyenne et basse, on trouvera un bilan carbone de 596,61 kg par poteau. Les valeurs sont affichées dans le tableau ci-dessous.

	Haut poteau	Bas poteau	Section (cm)	Type de béton	Volume poteau (m3)	Bilan carbone (kg)
Type 1	R+10	R+7	30x30	C40	1,21	184,07
Type 2	R+6	R+4	35x35	C50	1,08	178,89
Type 3	R+3	R+1	40x40	C50	1,41	233,65

596,61

- Proposition 3 :

Si l'on utilise du C30 en batterie haute, du C40 en batterie moyenne et basse, on trouvera un bilan carbone de 588,71 kg par poteau. Les valeurs sont affichées dans le tableau ci-dessous.

	Haut poteau	Bas poteau	Section (cm)	Type de béton	Volume poteau (m3)	Bilan carbone (kg)
Type 1	R+10	R+7	35x35	C30	1,64	208,13
Type 2	R+6	R+4	35x35	C40	1,08	165,03
Type 3	R+3	R+1	40x40	C40	1,41	215,55

588,71

Avec ces propositions, on peut voir que les bilans carbones sont considérablement différents, ce qui met en évidence l'intérêt d'étudier plusieurs configurations. A titre d'information, la solution prise était celle de la proposition 3, parce que le bilan carbone était le moins importante.

L'application de cette démarche permet de montrer la solution avec le moins d'impact carbone. Néanmoins, il n'est pas toujours possible de choisir la meilleure solution en termes d'impact sur l'environnement, mais au moins on peut analyser les solutions possibles.

Annexe 2 : Réhabilitation d'une tour existante

Introduction

Cette partie de la note vise à monter les résultats des calculs du scénario 0, qui consiste à étudier l'impact du réhausse de la tour X.

1. Documents de référence

Les documents de référence utilisé pour faire l'étude du scénario 0 sont :

- Note de stabilité générale de la superstructure, XXX, 08/08/1980
- Note de calculs – Descente de charges de la superstructure, XXX, 17/12/1980

a. Hypothèses de Calcul

On remarque quelques différences entre les hypothèses de calcul prises par XXX et XXX. Toutefois, la plupart des hypothèses restent les mêmes et les écarts ne sont pas très importants. Pour le calcul de la descente de charge actuelle, les hypothèses prises sont celles de XXX, car les valeurs de charges sont plus détaillées et les calculs ont été validés par Socotec. Le tableau ci-dessous synthétise les valeurs des charges des planchers.

Charges XXX (Phase EXE)

	g	g'	q
Plancher Terrasse (130,00 NGF)	5,75 KPa	4,60 KPa	1,00 KPa
Plancher 15eme étage (125,59 NGF)	9,93 KPa	2,77 KPa	5,00 KPa
Plancher 14eme étage (121,55 NGF)	3,07 KPa	4,83 KPa	2,50 KPa
Plancher 2eme au 13 étage	2,88 KPa	1,33 KPa	2,50 KPa
Plancher 1ere étage	4,00 KPa	2,54 KPa	2,50 KPa

Charges étage neuf

Plancher courante	3,78 KPa	0,70 KPa	3,50 KPa
-------------------	----------	----------	----------

Le tableau ci-dessous montre les hypothèses des charges prises pour les façades.

Zone Courante	Huisserie Vitrée	0,058 t/m ²
	Marbre	0,012 t/m ²
	Total	0,070 t/m²
Zone au-dessus de 121,53	Huisserie Vitrée	0,07 t/m ²
	Marbre	0,026 t/m ²
	Béton	0,197 t/m ²
	Total	0,293 t/m²

Zone au-dessus de 121,53 (locaux techniques)	Huisserie Vitrée	0,025 t/m ²
	Marbre	0,026 t/m ²
	Béton	0,291 t/m ²
	Total	0,342 t/m²
Zone au-dessous de 79,93	Marbre	0,081 t/m ²
	Coque béton	0,356 t/m ²
	Total	0,437 t/m²

Les valeurs des charges des façades montrent que le poids propre du Marbre n'est pas si important. Par conséquent, la suppression du Marbre de façade n'a pas d'impact significatif sur la descente de charge.

b. Descente de charges existante

Ci-dessous un extrait de la synthèse de la Descente de charges phase exécution (XXX).

	Socotec		XXX	Ecart
	Charge calculée	Charge permise	Charge calculée	Charge calculée (XXX) - Charge permise (XXX)
P1	1675 t	1528 t	1696 t	-168 t
P2	1460 t	1983 t	1749 t	234 t
P3	1330 t	1945 t	1653 t	292 t
P4	1430 t	1331 t	1316 t	15 t
P5	1730 t	2332 t	2191 t	141 t
P6	1720 t	2476 t	812 t	1664 t
P7	1800 t	2563 t	1058 t	1505 t
P8	1711 t	2958 t	2146 t	812 t
P9	1390 t	1952 t	1383 t	569 t
P10	1460 t	2094 t	1476 t	618 t
P11	1740 t	3034 t	2082 t	952 t
P12	1190 t	2106 t	1154 t	952 t
P13	1290 t	2459 t	1618 t	841 t
P14	1990 t	3200 t	2141 t	1059 t
P15	1190 t	1100 t	1161 t	-61 t
P16	1930 t	2459 t	1763 t	696 t
P17	2570 t	3023 t	2915 t	108 t

Globalement, on a un peu de marge pour la DDC des ailes sur les infrastructures, mais localement on a un déficit de portance au niveau des bouts des ailes.

2. Calcul de la descente de charges actuelle

Le premier calcul consiste à refaire la descente de charges de la note de XXX avec les règles de dégression utilisées dans l'époque. La descente de charge est calculée jusqu'au système d'appuis de la Tour.

Le deuxième calcul consiste à refaire la descente de charges en considérant une réduction des charges d'exploitation pour pouvoir gagner de la marge sur la descente de charges des superstructures. La réduction admet une limitation des charges des exploitations, globalement on passe de 2.5 KPa à 2.0 KPa, pour les charges d'exploitation du plancher courante.

Poteau courante		ELS CARA
DDC actuelle GTM	Poteau Façade	1728 KN
	Poteau dans l'Axe	1975 KN
DDC future 1 EC2	Poteau Façade	1667 KN
	Poteau dans l'Axe	1853 KN

3. Etude du réhausse de la tour

Vu qu'on n'a pas trop d'information sur les appuis roulants (Notes de calculs) et qu'on n'a pas trop de marge sur au niveau des infrastructures. On a décidé de rester iso-charge dans les descentes de charges des superstructures.

Poteau courante		ELS CARA	Ecart
DDC actuelle XXX	Poteau Façade	1728 KN	0,00%
	Poteau dans l'Axe	1975 KN	0,00%
DDC future 1 EC2	Poteau Façade	1667 KN	-3,52%
	Poteau dans l'Axe	1853 KN	-6,15%
DDC future 1 EC2 + 1etage	Poteau Façade	1748 KN	1,21%
	Poteau dans l'Axe	1995 KN	1,01%

En comparant avec le premier calcul, on peut voir que le rehausse de 1 étage résulte dans la même descente de charge du premier calcul (On a un dépassement de 1% au niveau de la descente de charges)

4. Reconstruire la tour

On a également étudié un deuxième scénario dans lequel on prévoit une démolition des ailes et après une reconstruction des ailes. Dans ce cas, on pourrait refaire le système appuis, mais on restera limité par la capacité de l'infrastructure existante.

Vu qu'on n'a pas trop de marge sur les infrastructures, on ne pourrait pas gagner des étages supplémentaires, car les charges de nouveaux étages sont plus lourdes que les charges existantes. Le tableau ci-dessous compare les résultats de la descente de charges en considérant la reconstruction de la tour avec le même nombre étages.

Poteau courante		ELS CARA	Ecart
DDC actuelle GTM	Poteau Façade	1728 KN	0,00%
	Poteau dans l'Axe	1975 KN	0,00%
DDC reconstruction	Poteau Façade	1782 KN	3,16%
	Poteau dans l'Axe	2084 KN	5,53%

Ce scénario de reconstruction peut être intéressant si l'on prévoit des renforcements au niveau de l'infrastructure.

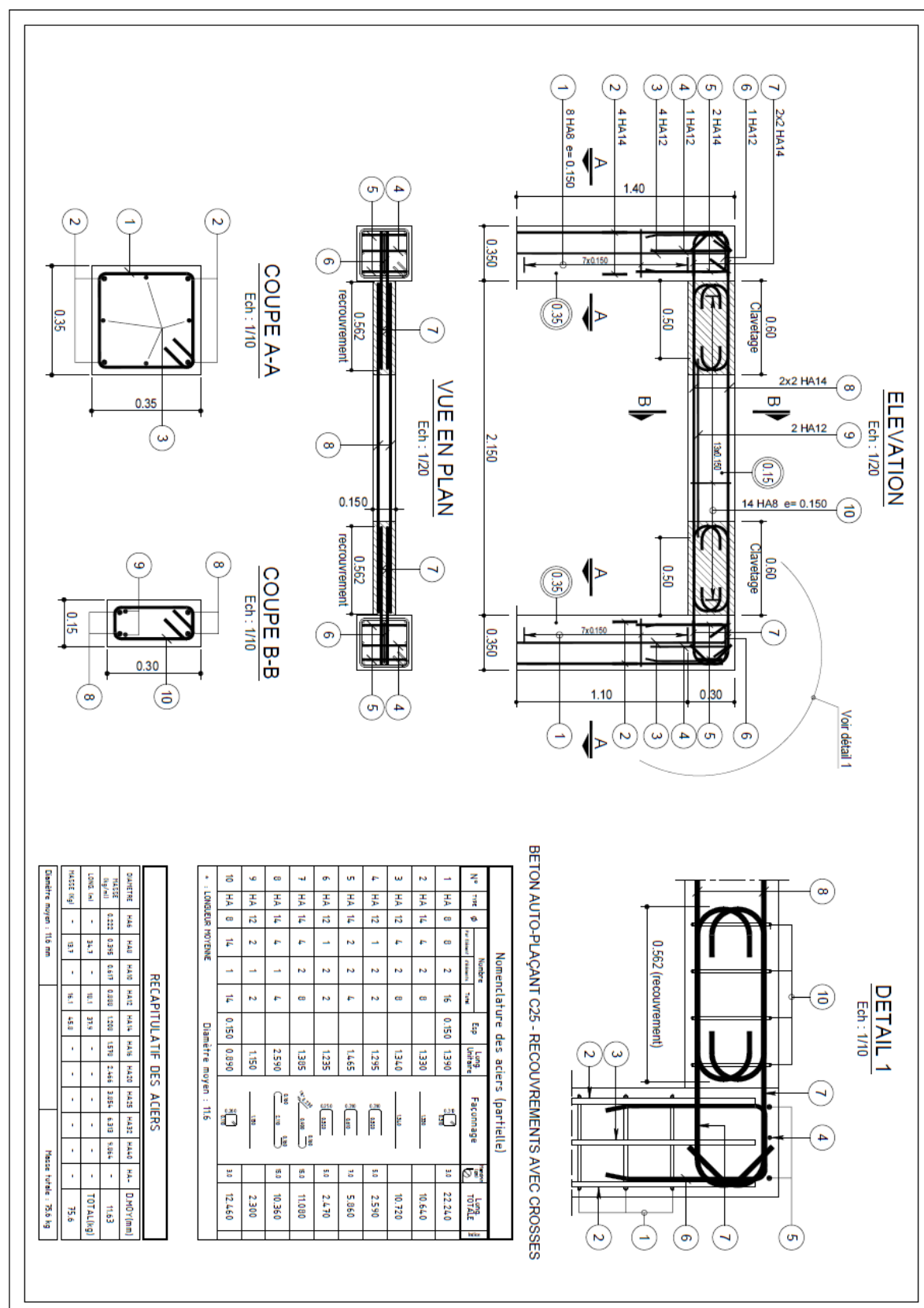
5. Conclusion

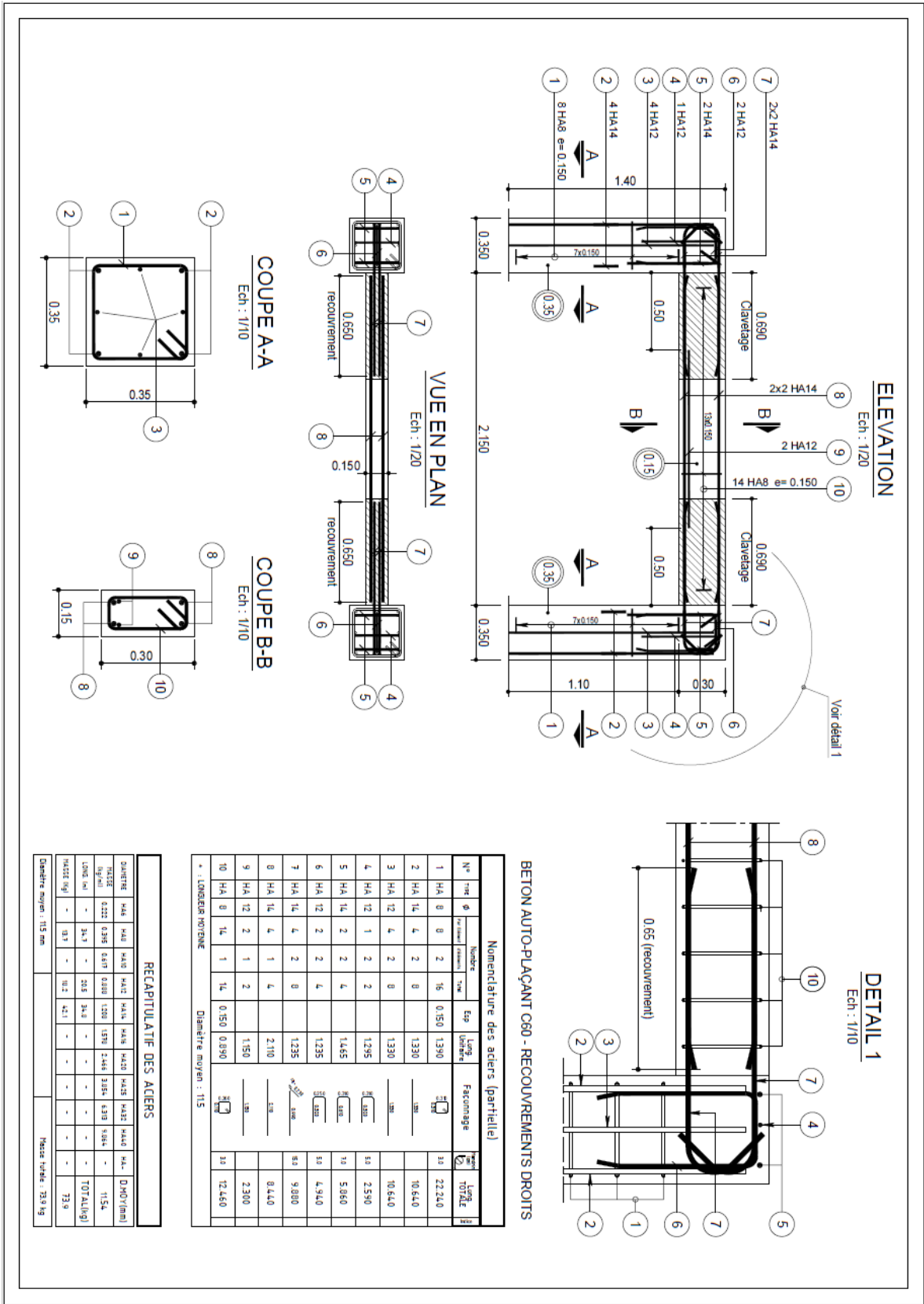
Ces conclusions sont basées sur des informations extraites des notes de calcul faites à l'époque de la construction de la Tour. Par conséquent, tout type d'intervention devraient être suivis d'études complémentaires pour confirmer l'état actuel de la tour.

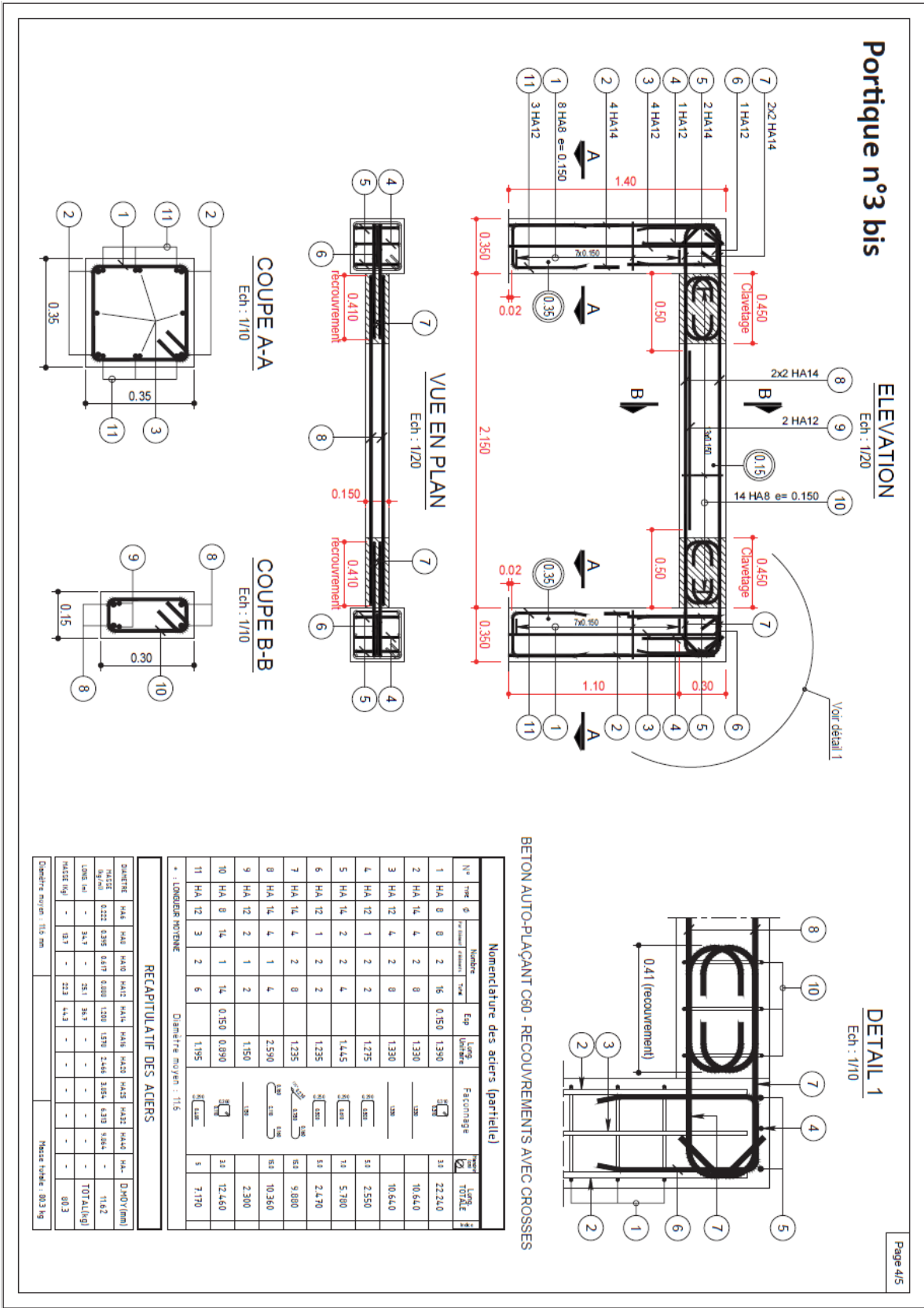
- Si on limite les charges d'exploitation, on pourrait étendre la tour d'un étage. Globalement, cette solution ne sollicite pas des renforcements, mais des renforcements locaux peuvent être nécessaires.
- Le scénario de reconstruction de la Tour n'est pas intéressant si l'on garde l'état actuel des infrastructures, car on ne gagne pas de surface supplémentaire.

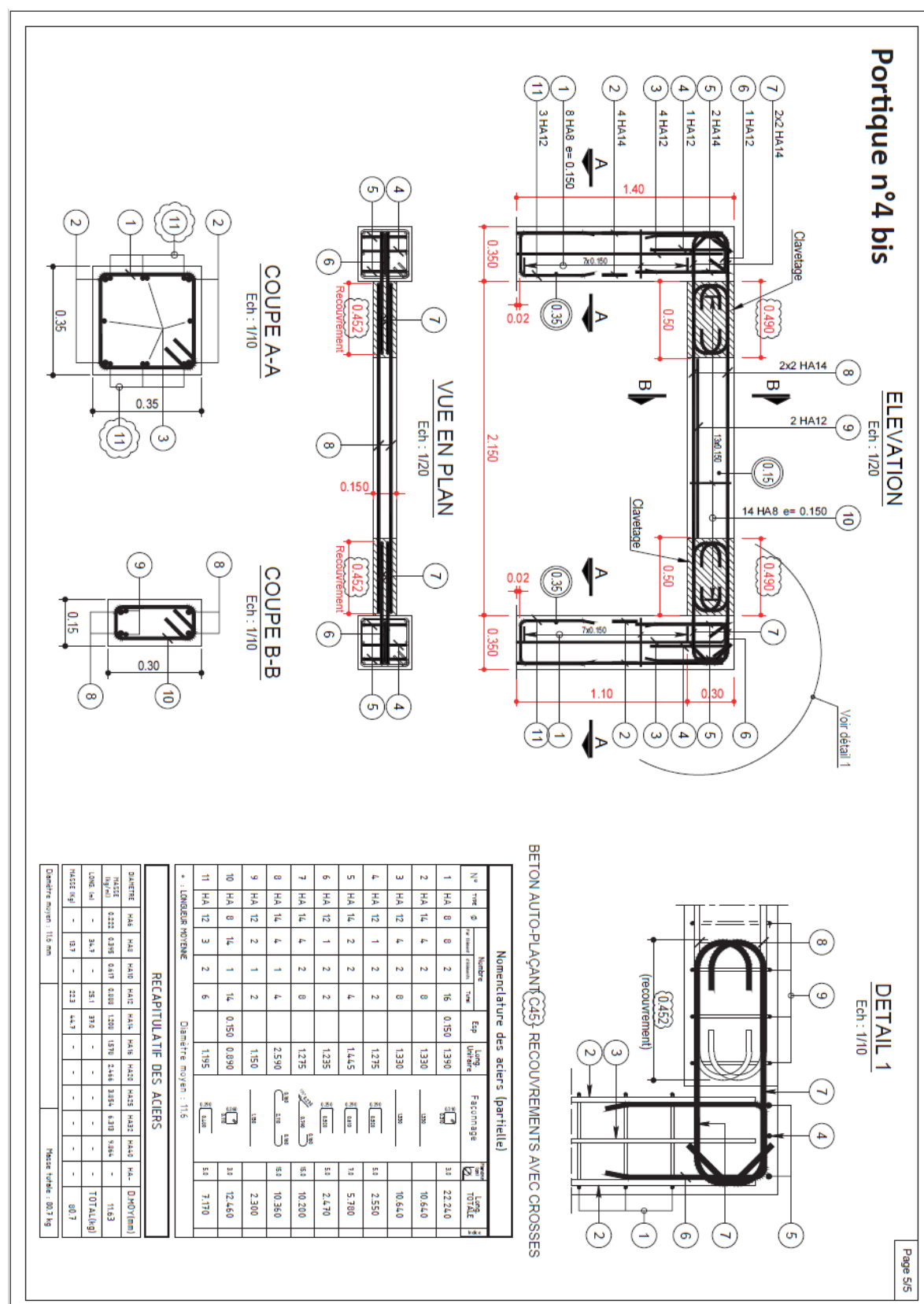
Annexe 3 : Plans de ferrailage des portiques

Portique 1 : Zones de clavetage en C25 avec des recouvrements en crosses

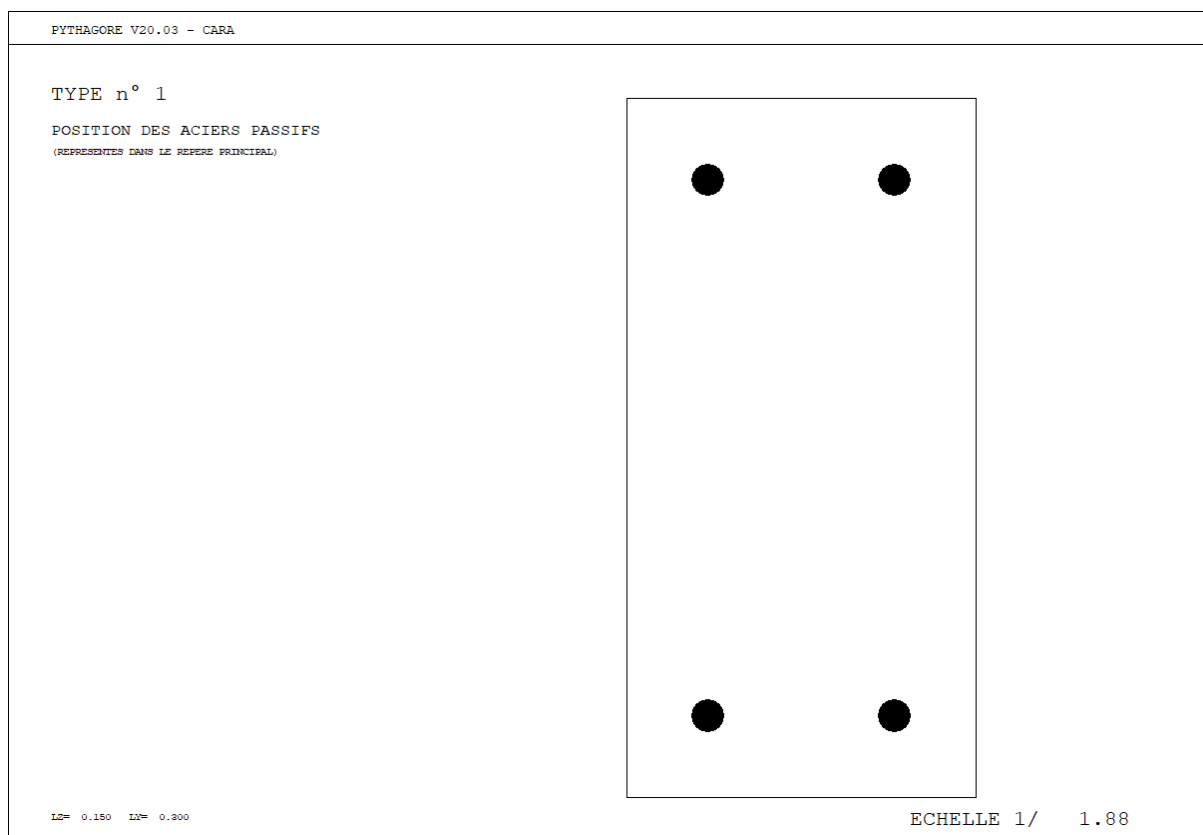


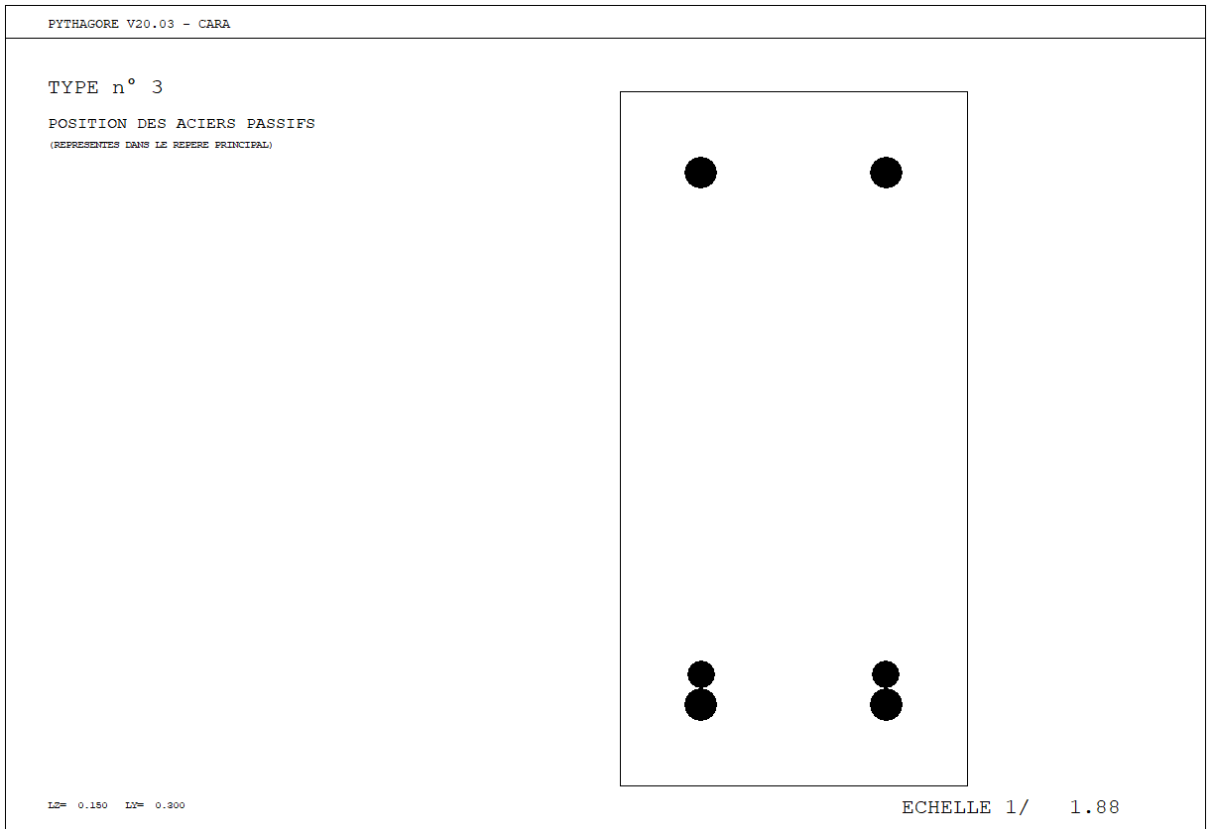
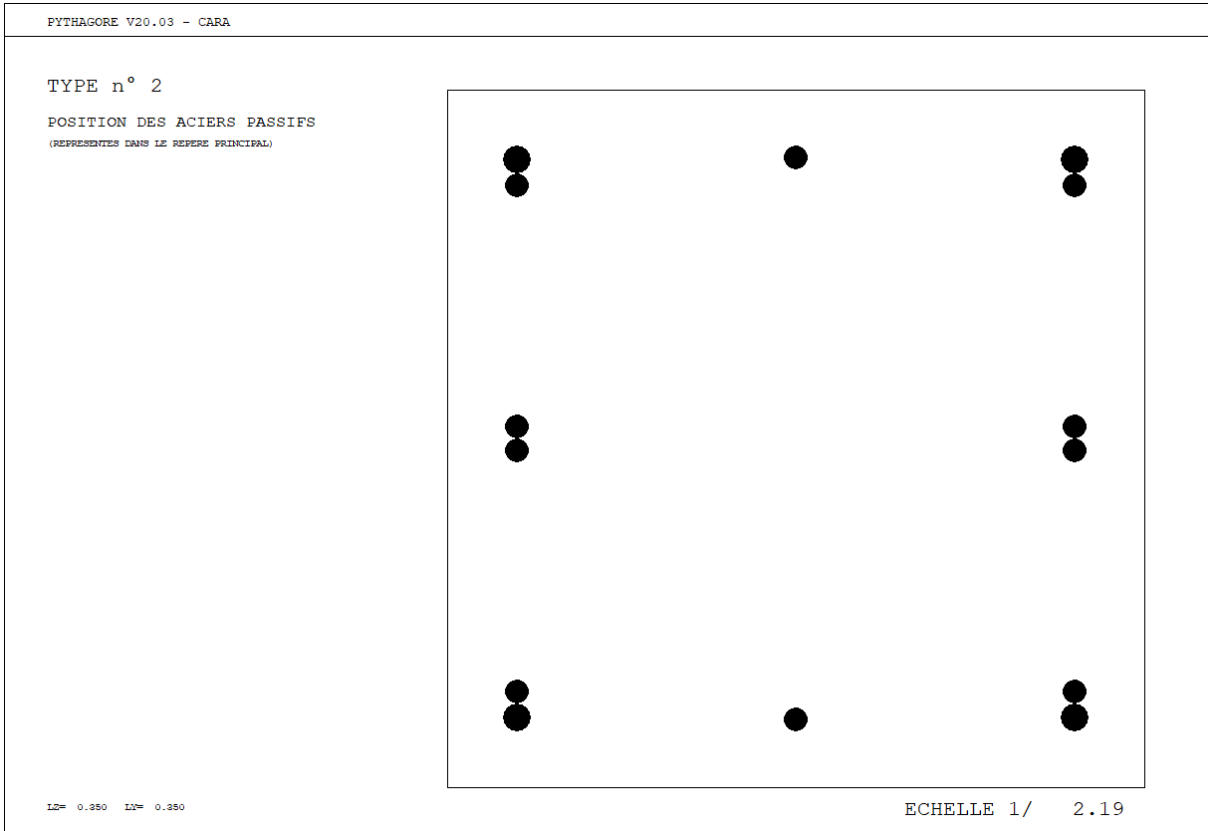


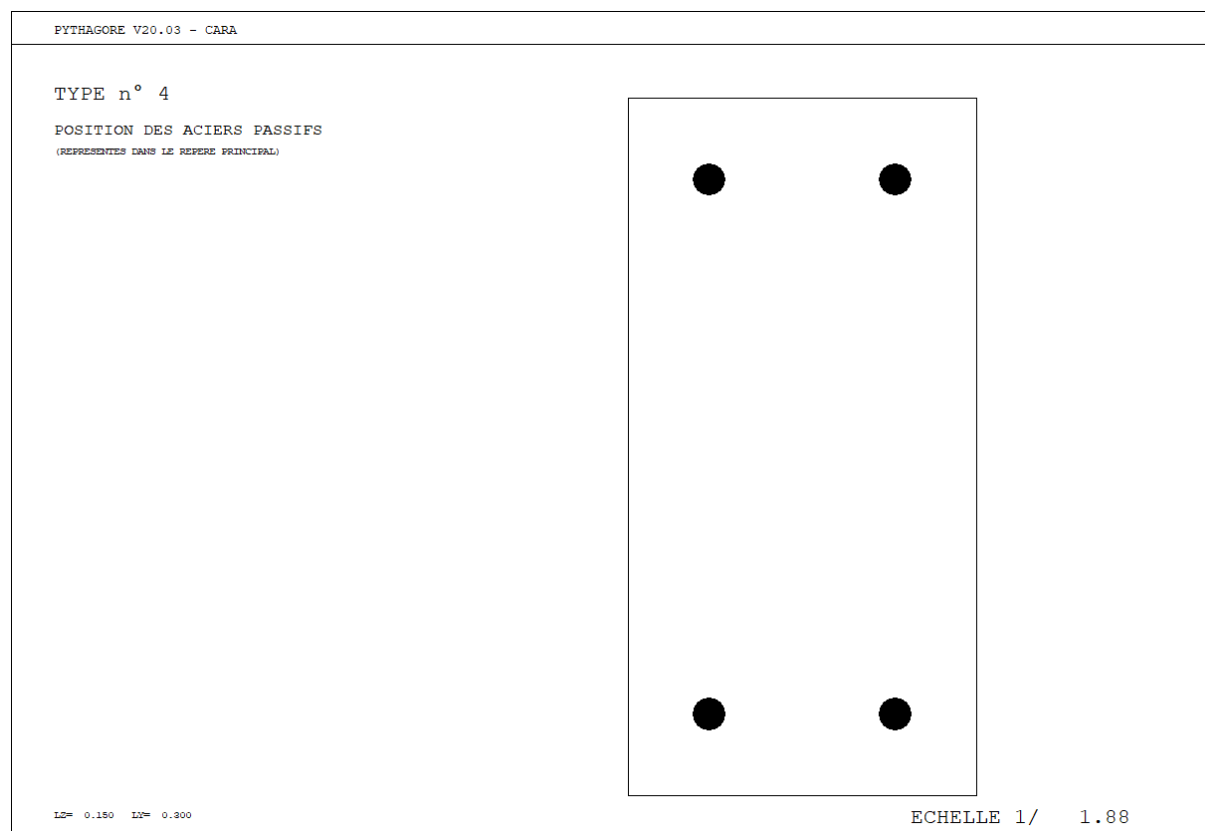




Annexe 4 : Sections définies dans Pythagore







Annexe 5 : Codes VBA

Code d’application de la méthode de réemploi :

```
Private Sub CommandButton1_Click()

    Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, numremp As Integer, numbase As Integer, temp As Range

    Application.ScreenUpdating = False
    Worksheets("Calcul").Activate

    Worksheets("Calcul").Cells(4, 22).Value = "Possibilité de réemployer"
    Worksheets("Calcul").Cells(4, 23).Value = "Numération élément Base"
    Worksheets("Calcul").Cells(4, 24).Value = "L"
    Worksheets("Calcul").Cells(4, 25).Value = "Aire"
    numremp = Worksheets("Calcul").Range("O4").CurrentRegion.Rows.Count - 1
    numbase = Worksheets("Calcul").Range("B4").CurrentRegion.Rows.Count - 1
    i = 5
    While i <= numremp + 4
        For j = 5 To numbase + 4
            If Worksheets("Calcul").Cells(i, 20).Value < Worksheets("Calcul").Cells(j, 7).Value And Worksheets("Calcul").Cells(j, 3).Value > 0 And '
                If Worksheets("Calcul").Cells(j, 3).Value - Worksheets("Calcul").Cells(i, 16).Value < 0 Then
                    'Commande qui divise les types d'éléments
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 15).Select
                    Worksheets("Calcul").Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
                    Worksheets("Calcul").Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
                    Selection.Copy
                    Worksheets("Calcul").Cells(i + 1, 15).Select
                    ActiveSheet.Paste
                    numremp = numremp + 1
                    ''
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 22).Value = "oui"
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 23).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 2).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 24).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 4).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 25).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 7).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(i + 1, 16).Value = Worksheets("Calcul").Cells(i, 16).Value - Worksheets("Calcul").Cells(j, 3).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 16).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 3).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(j, 3).Value = 0
                    j = numbase + 4
                Else
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 22).Value = "oui"
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 23).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 2).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 24).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 4).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(i, 25).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 7).Value
                    Worksheets("Calcul").Cells(j, 3).Value = Worksheets("Calcul").Cells(j, 3).Value - Worksheets("Calcul").Cells(i, 16).Value
                    j = numbase + 4
                End If
            Else
                Worksheets("Calcul").Cells(i, 22).Value = "non"
            End If
        Next j
        i = i + 1
    Wend
    Worksheets("Output").Activate
End Sub
```

Méthode d’importation des données :

```
Option Explicit
Sub Importer_Inputs()
'
' Importer_Inputs Macro
' Importe des éléments de la base des données
'
' Touche de raccourci du clavier: Ctrl+i

Application.ScreenUpdating = False

'''''''''' Clear all cells
Sheets("Calcul").Select
Cells.Select
Selection.ClearContents
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
With Selection.Interior
    .Pattern = xlNone
    .TintAndShade = 0
    .PatternTintAndShade = 0
End With

'''''''''' Importe Input - Base éléments
Range("B4").Select
Sheets("Input - Base éléments").Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-30
Range("B4").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.Copy
Sheets("Calcul").Select
Range("B4").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.AutoFilter
ActiveWorkbook.Worksheets("Calcul").AutoFilter.Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("Calcul").AutoFilter.Sort.SortFields.Add2 Key:= _
    Range("G4:G10000"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _
    xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("Calcul").AutoFilter.Sort
    .Header = xlYes
    .MatchCase = False
    .Orientation = xlTopToBottom
    .SortMethod = xlPinYin
    .Apply
End With

'''''''''' Importe Input - Sollicitations
Sheets("Input - Sollicitations").Select
Range("B4").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.Copy
Sheets("Calcul").Select
Range("O4").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.AutoFilter
Selection.AutoFilter
ActiveWorkbook.Worksheets("Calcul").AutoFilter.Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("Calcul").AutoFilter.Sort.SortFields.Add2 Key:= _
    Range("T4:T10000"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption _
    :=xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("Calcul").AutoFilter.Sort
    .Header = xlYes
    .MatchCase = False
    .Orientation = xlTopToBottom
    .SortMethod = xlPinYin
    .Apply
End With
Sheets("Output").Select
Range("A1").Select
MsgBox "Les données ont été importées avec succès"
End Sub
```


Méthode d’importation des résultats :

```
Sub Importer_resultats()  
'  
' Importer_resultats Macro  
'  
' Touche de raccourci du clavier: Ctrl+r  
  
Application.ScreenUpdating = False  
  
'''Réinitialiser données  
Range("H4:r4").Select  
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
Selection.ClearContents  
  
'''Importer resultats  
Range("B11").Select  
Sheets("Calcul").Select  
Range("O4:Y4").Select  
Selection.End(xlDown).Select  
Selection.End(xlUp).Select  
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select  
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
Selection.Copy  
Sheets("Output").Select  
Range("H4").Select  
ActiveSheet.Paste  
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-21  
Application.CutCopyMode = False  
Selection.AutoFilter  
Range("H4").Select  
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select  
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
With Selection.Interior  
    .Pattern = xlNone  
    .TintAndShade = 0  
    .PatternTintAndShade = 0  
End With  
With Selection.Interior  
    .Pattern = xlSolid  
    .PatternColorIndex = xlAutomatic  
    .ThemeColor = xlThemeColorDark1  
    .TintAndShade = 0  
    .PatternTintAndShade = 0  
End With  
With Selection.Interior  
    .Pattern = xlSolid  
    .PatternColorIndex = xlAutomatic  
    .ThemeColor = xlThemeColorDark1  
    .TintAndShade = 0  
    .PatternTintAndShade = 0  
End With  
With Selection.Font  
    .ThemeColor = xlThemeColorLight1  
    .TintAndShade = 0  
End With  
Range("H4:r4").Select  
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone  
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone  
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ColorIndex = 0  
    .TintAndShade = 0  
    .Weight = xlThin  
End With  
With Selection.Borders(xlEdgeTop)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ColorIndex = 0  
    .TintAndShade = 0  
    .Weight = xlThin  
End With  
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ColorIndex = 0  
    .TintAndShade = 0  
    .Weight = xlThin  
End With  
With Selection.Borders(xlEdgeRight)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ColorIndex = 0  
    .TintAndShade = 0  
    .Weight = xlThin  
End With  
With Selection.Borders(xlInsideVertical)  
    .LineStyle = xlContinuous  
    .ColorIndex = 0  
    .TintAndShade = 0  
    .Weight = xlThin  
End With
```

```
With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlThin
End With
Range("O5:R5").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlHairline
End With
Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlHairline
End With
With Selection.Borders(xlInsideVertical)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlHairline
End With
Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
Range("H4:R4").Select
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlThin
End With
With Selection.Borders(xlInsideVertical)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlThin
End With
MsgBox "Les résultats ont été importées avec succès"
End Sub
```