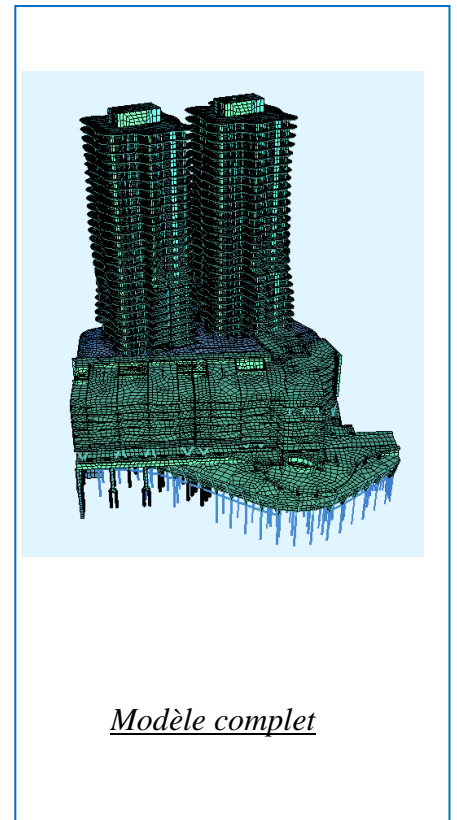


Partie C : Réalisation de la modélisation

A.1 Principe de la modélisation géométrique

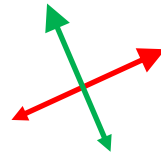
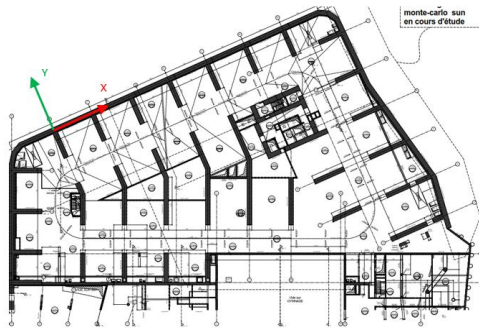
A.1.1 Décomposition en trois parties indépendantes

La modélisation a été décomposée en trois parties indépendantes assemblées en phase finale :



A.1.2 Choix du repère

Le repère général est pris dans le sens de la paroi arrière ce qui correspond aux axes de la tour et globalement aux directions des poussées des terres, dans le but de rendre cohérent le calcul sismique qui sera réalisé selon les axes principaux de la tour.



Axes de la tour

Définition du repère général

A.1.3 Utilisation de la maquette BIM

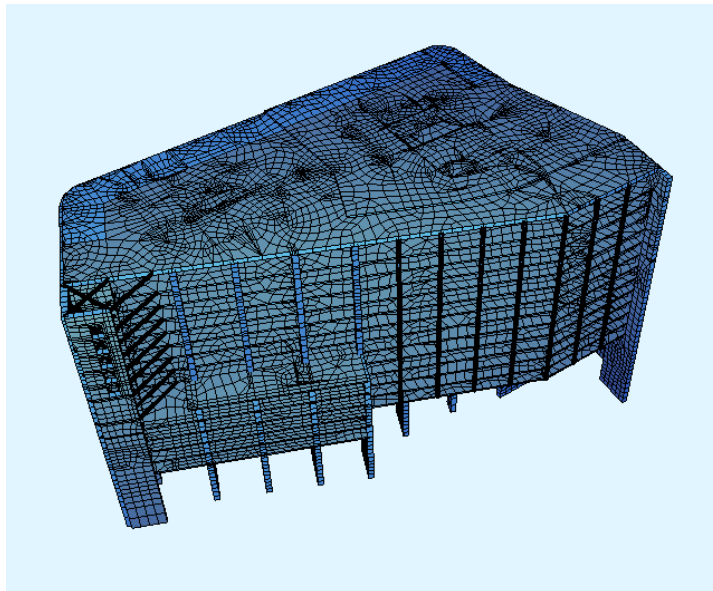
Le dossier PRO comprenant une maquette BIM, il aurait pu être intéressant de l'utiliser pour générer la géométrie du modèle, mais rapidement il est apparu beaucoup plus simple et rigoureux d'étudier chaque niveau séparément à partir des fichiers autocad pour définir les lignes moyennes des panneaux.

Cela permet de bien comprendre le fonctionnement de la structure et de s'assurer du bon transfert des charges entre niveaux ou entre les éléments eux même.

Cette étape manuelle est importante car elle permet de simplifier la modélisation en supprimant les détails locaux qui n'ont aucun effet dans la répartition générale des efforts, ils feront ensuite l'objet d'études locales. Cela concerne principalement les alignements de voiles, de dalles, la suppression de petites réservations, la suppression de voiles secondaires, etc..

A.2 Modélisation de la zone arrière du socle « grande fouille »

A.2.1 Caractéristiques du modèle



Vue du modèle de la zone arrière du socle : grande fouille

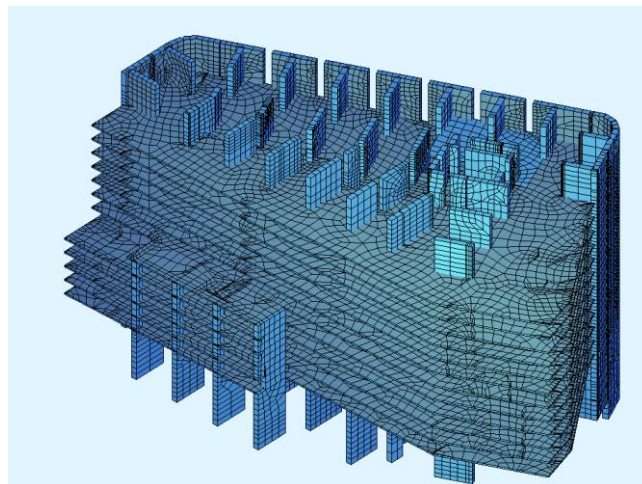
C'est la zone la plus délicate car elle est soumise aux poussées des terres, et elle est réalisée en taube avec le phasage suivant :

- Réalisation des parois moulées et barrettes
- Réalisation de la dalle supérieure (support de la tour)
- Terrassement du premier niveau
- Bétonnage du 1^{er} plancher
- Réalisation des autres niveaux inférieurs selon le même principe

La dissymétrie des poussées des terres entre l'amont et l'aval nécessite une reprise partielle des poussées des terres par les barrettes centrales lors de la réalisation des terrassements qui n'est pas calculable par les méthodes classiques 2D, d'où la nécessité de procéder à un calcul phasé 3D.

Les principales caractéristiques de cette modélisation sont :

- Modélisation de la paroi moulée en éléments de coques avec mise en place de ressorts à la jonction entre panneau
- Modélisation des contreforts en éléments de coques avec des ressorts modélisant l'appui de la paroi moulée sur ces contreforts
- Prise en compte de zones de butées dans les zones n'affectant pas les avoisinants.
- Prise en compte de frottements horizontaux dans les zones n'affectant pas les avoisinants.
- Réalisation de 4 calculs sismiques (sens +X -X +Y -Y)
- Calcul phasé des phases de terrassements

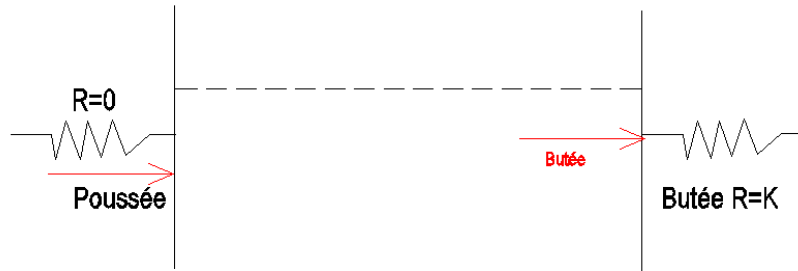


Vue de la grande fouille sans les dalles supérieures

A.2.2 Modélisation du sol par des ressorts

La liaison de la paroi moulée sur le sol dépend du sens de l'effort :

- -soit la paroi appuie sur le sol, le ressort est alors mis en butée sa raideur est celle en butée
- -soit la paroi tire sur le sol, il y alors décollement, la raideur du ressort est donc nulle (la paroi est en fait en état de poussée)



Etats de poussée et butée de parois encadrant un plancher

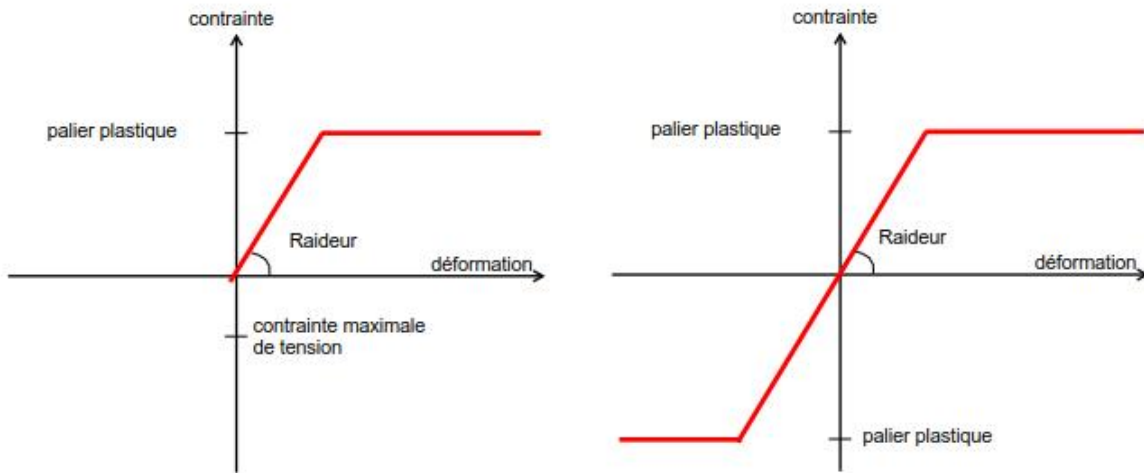
Il apparait donc des zones de poussées et de butées pour chaque cas de charge.

Nous avons envisagé 2 méthodes :

- Soit définir manuellement par itérations les zones de butées pour chaque combinaison de charge.
- Soit utiliser des ressorts non linéaires travaillant seulement en butée

C'est la deuxième méthode non linéaire qui a été adoptée , car les temps de calculs se sont révélés acceptables.

Deux lois matériaux sont utilisées pour les ressorts de modélisation de sol :

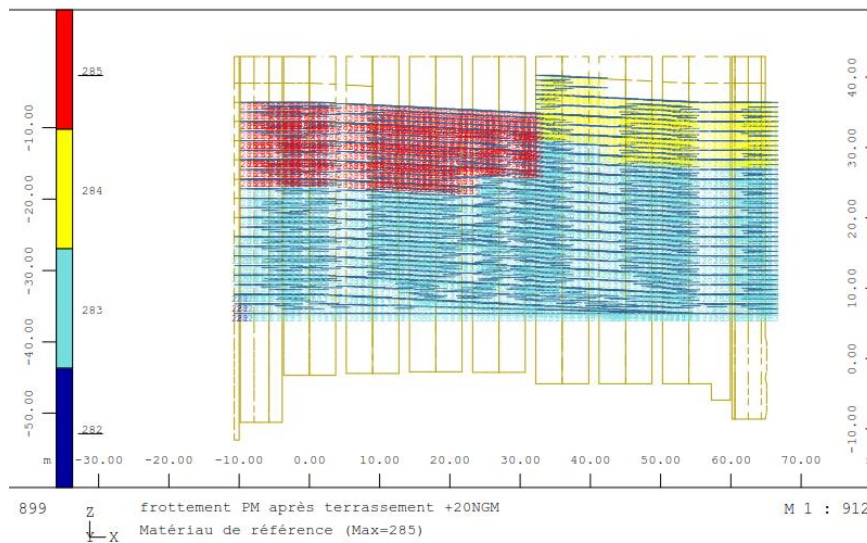


Ressorts en butée

Ressorts de frottement (et butée en fond de fouille)

Les ressorts de frottement sont horizontaux : pas de frottement dans le sens vertical

Ces ressorts concernent les raideurs frontales et les raideurs en frottement, il varie en fonction des couches de sol.

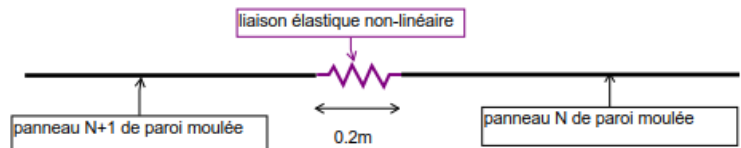
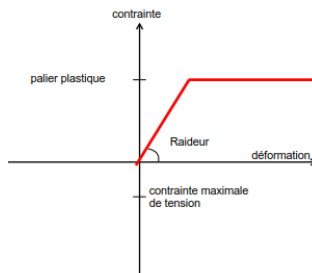


Exemple de localisation de ressorts de sol

A.2.3 Liaisons entre panneaux des parois moulées

La liaison entre panneaux de paroi moulée/barrette ou entre paroi moulée et contrefort est modélisée par un vide entre les éléments de 0.20m entre panneaux et 0.5m entre paroi et contrefort. Les 2 panneaux sont ensuite reliés par une liaison ressort non-linéaire avec la loi de comportement suivante :

| Constantes et contraintes d'appui réparti élastique | | Coefficients et masses | |
|---|--|--|--|
| <input type="button" value="Automatique ..."/> | | <input checked="" type="checkbox"/> Coefficient de friction: | <input type="text" value="0.700"/> [-] |
| Constante élastique: | <input type="text" value="1000000.00"/> [kN/m ³] | Coefficient de dilatation: | <input type="text" value="0.0"/> [-] |
| Constante élastique tangente à la surface: fck | <input type="text" value="1000000.00"/> [kN/m ³] | <input type="checkbox"/> Cohésion: | <input type="text" value="0.0"/> [MPa] |
| <input checked="" type="checkbox"/> Contrainte maximale de tension: | <input type="text" value="0.0"/> [MPa] | Distribution de masses équivalentes: | <input type="text" value="0.0"/> [t/m ²] |
| <input type="checkbox"/> Contrainte maximale: | <input type="text" value="0.0"/> [MPa] | | |

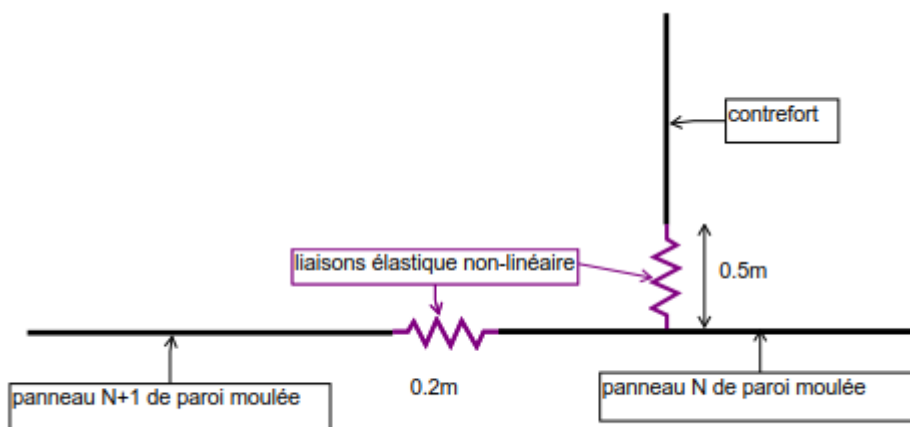


Liaison entre panneaux de la paroi moulée

Un coefficient de friction de 0.7 est ajouté pour modéliser un frottement dans le plan du contact entre panneaux avec une limite de $0.7 \times$ contrainte normale à la surface

A.2.4 Liaisons entre les contreforts et les panneaux de la paroi moulée

Elle est réalisée selon le même principe que pour la liaison entre panneaux de la PM



Liaison entre les contreforts et les panneaux de la paroi moulée

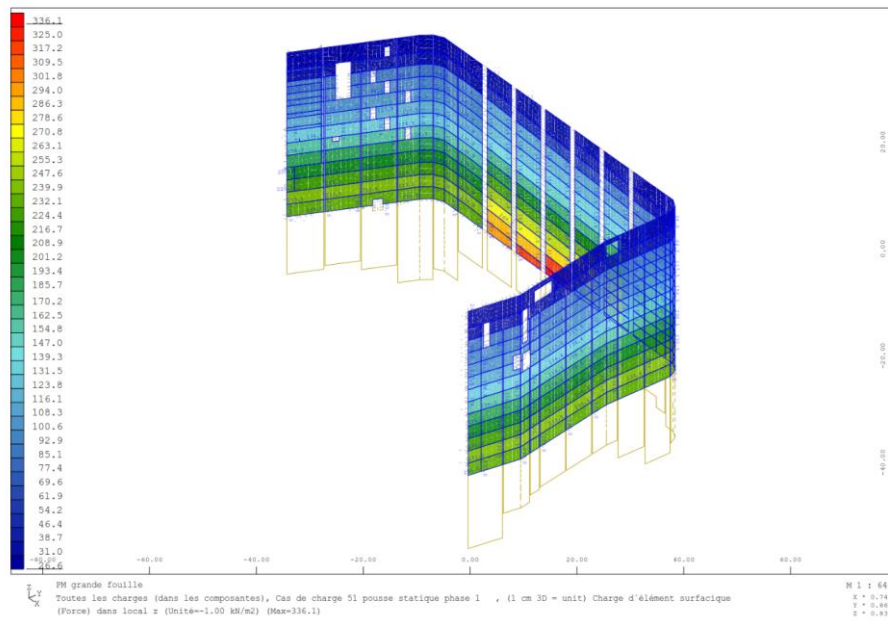
A.2.5 Chargements

A.2.5.1 Charges pondérales

Elles sont simples à décrire : poids propre, charges permanentes additionnelles et surcharges

A.2.5.2 Poussées statiques des terres

Elles sont issues de la modélisation 3D géotechnique



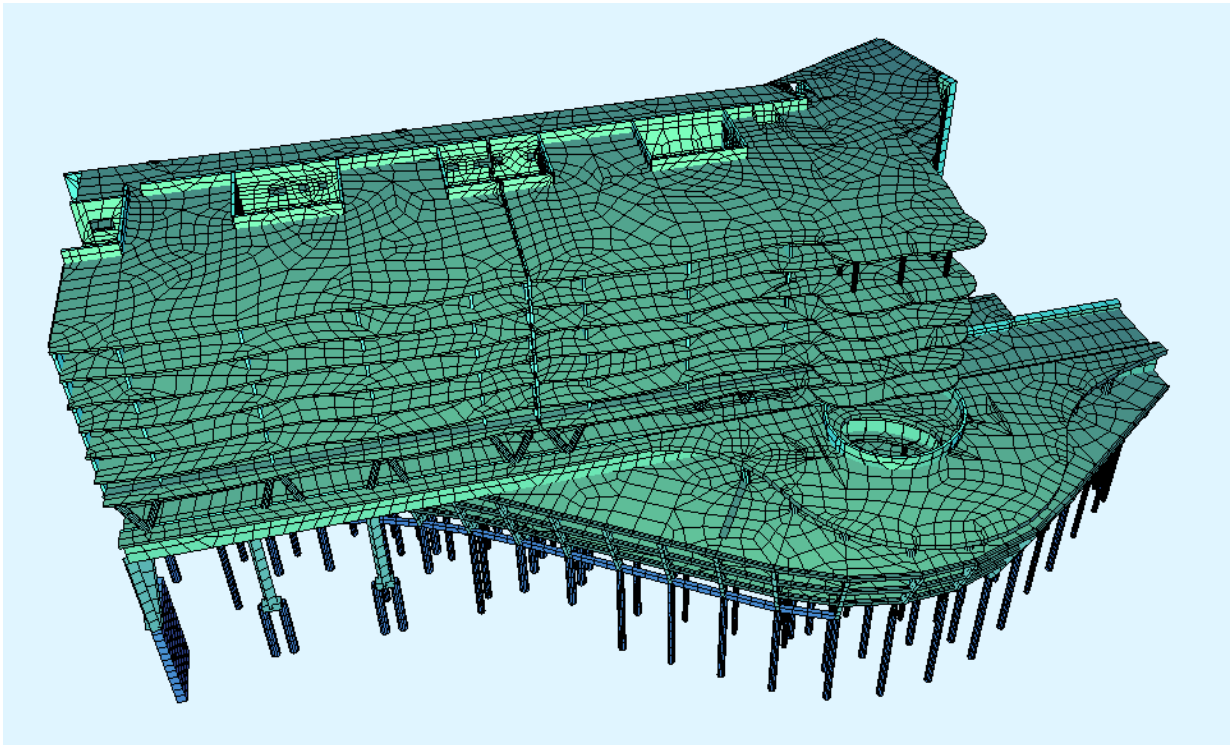
A.3 Modélisation de la zone avant du socle « zone école et logements »

Cette modélisation est beaucoup plus classique et traditionnelle.

Elle est constituée d'éléments de coques (planchers et voiles) et d'éléments filaires (poteaux et poutres)

Les fondations sont modélisées entièrement comme pour la zone arrière.

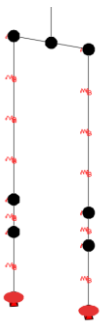
Cette zone n'est soumise qu'à des charges pondérales



Vue générale du modèle de la zone école

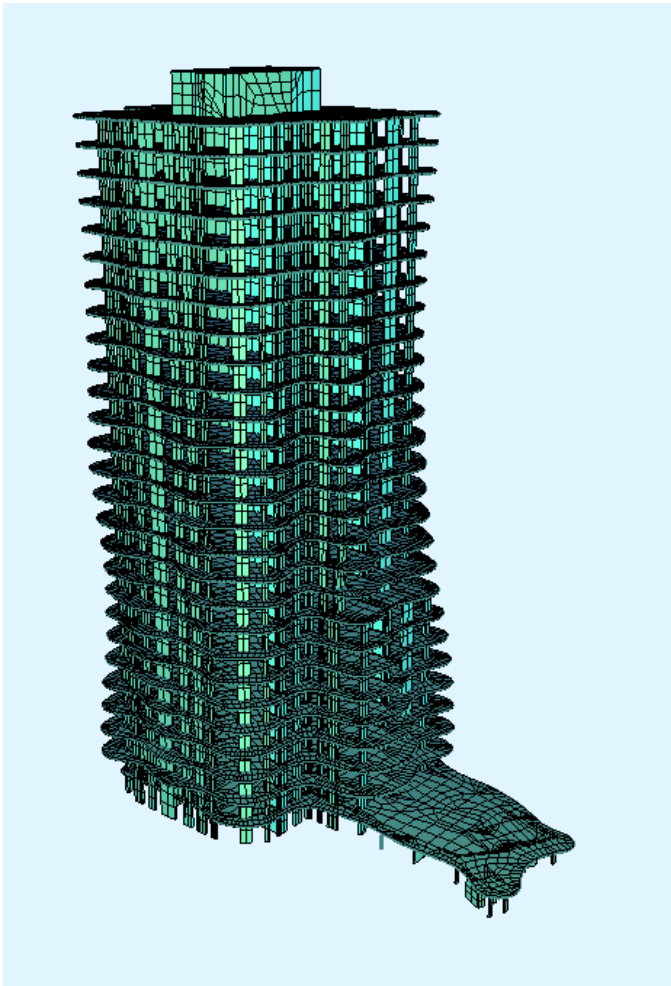
Il est à remarquer que les longueurs des niveaux inférieures dépassent 100 ml donc supérieures aux longueurs réglementaires de prise en compte des effets du retrait.

Un calcul de cette zone sous les effets du retrait devra être réalisé lors de la deuxième phase d'étude, afin de déterminer les ferrailages longitudinaux des voiles et planchers.



Par homogénéité avec la grande fouille, les pieux des fondations sont modélisés entièrement avec mise en place de ressorts horizontaux et verticaux selon les couches de sol.

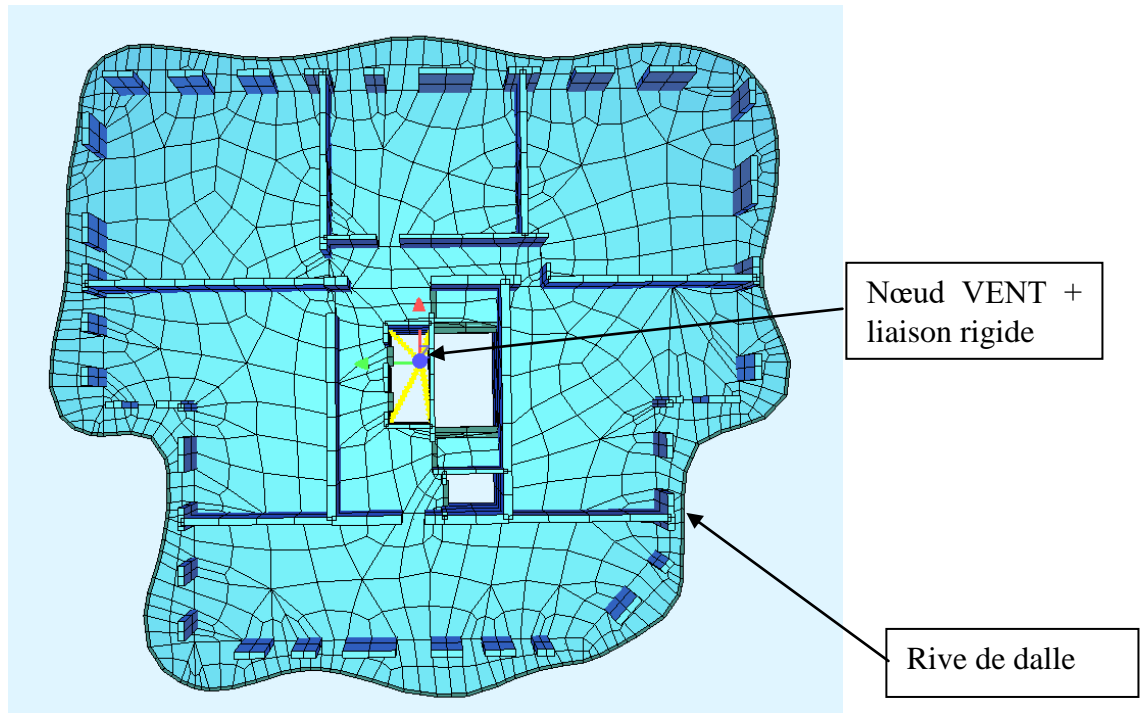
A.4 Modélisation de la tour



La modélisation de la tour est classique et traditionnelle, elle est constituée d'éléments de coques pour les voiles et planchers et d'éléments filaires pour les poutres et les poteaux.

Le problème principal réside dans la taille élevée du nombre d'éléments du fait du nombre important de niveaux.

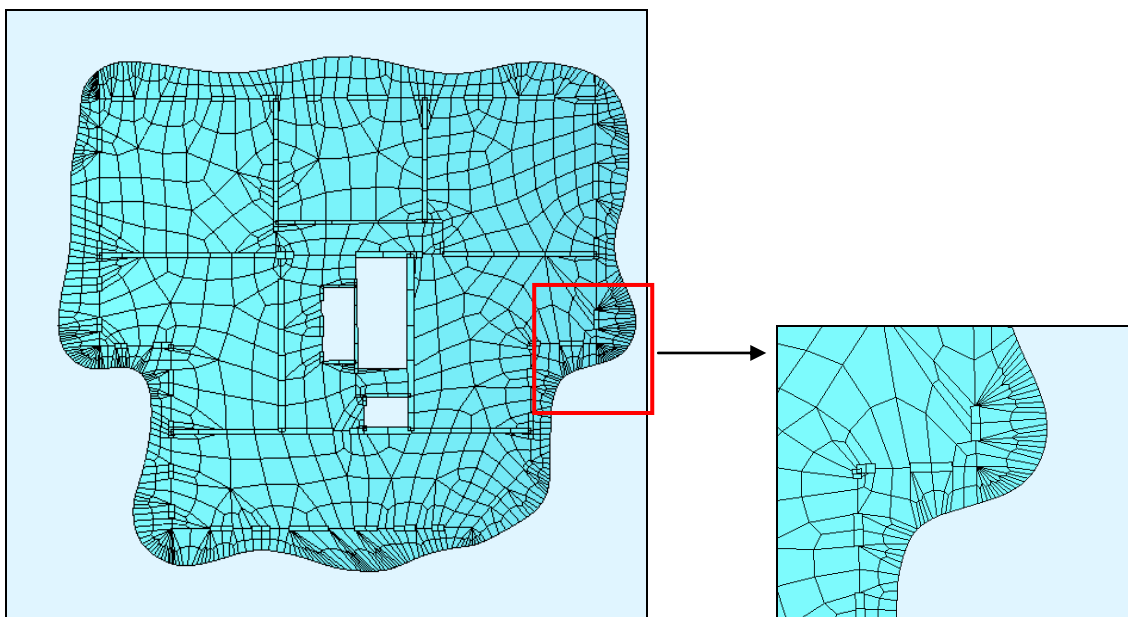
Dans la première étape de ce calcul des fondations, la tour n'intervient que par ses effets à sa base (niveau supérieur du socle). La taille des mailles intervient peu, elle sera donc importante.



Vue d'un niveau courant de la tour

Une des particularités de la tour concerne le dessin de la rive de dalle très tourmenté et variable à chaque niveau. Il n'y a pas deux rives de dalles identiques

Le tracé de la rive de dalle a dû être travaillé afin de supprimer de nombreux points du fichier DWG origine de l'architecte qui présentait des distances très faibles voire millimétriques entre deux points.



Maillage de la dalle avant épuration des points inutiles sur la rive de dalle

Cet exemple montre bien les problèmes rencontrés lors de la récupération automatique de fichiers DWG ou REVIT.

Bien que n'étudiant pas dans un premier temps les effets du vent non dimensionnant, la modélisation comprend à chaque étage la définition d'un nœud « VENT » positionné au centre de gravité du plancher et liaisonné aux voiles du noyau par des liaisons rigides.

Ces nœuds serviront par la suite à introduire les torseurs des charges de vent calculés dans le rapport vent pour chaque niveau de la tour.

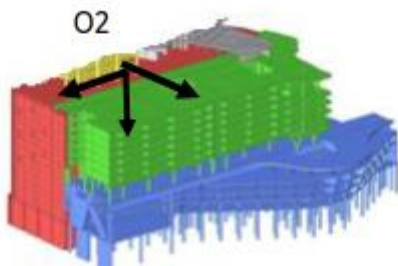
A.5 Modélisation de la deuxième tour optionnelle

Cette deuxième tour est identique à la première et sera peut être construite dans le futur.

Autant pour la première tour, il est apparu rapidement la nécessité de la modéliser entièrement par des éléments de coques, autant pour cette deuxième tour optionnelle, nous avons étudié des solutions limitant la taille du modèle.

A.5.1 Solution 1 : modélisation de la 2eme tour par son torseur des efforts à sa base

C'est la solution la plus simple qui consiste à calculer les torseurs résultants à la base (point O2 ci-dessous) pour chaque cas de charge et à les appliquer directement sur le modèle général.



Les torseurs résultants sismiques de la 2eme tour sont alors calculés sur un modèle de la tour seule encastree à sa base.

Cette méthode n'a pas pu être mise en application car elle cumule directement les efforts sismiques des deux tours générant ainsi des efforts non admissibles dans la paroi moulée. Il est apparu en effet lors du dossier PRO qu'il n'y avait pas d'interférence sismique entre les 2 tours.

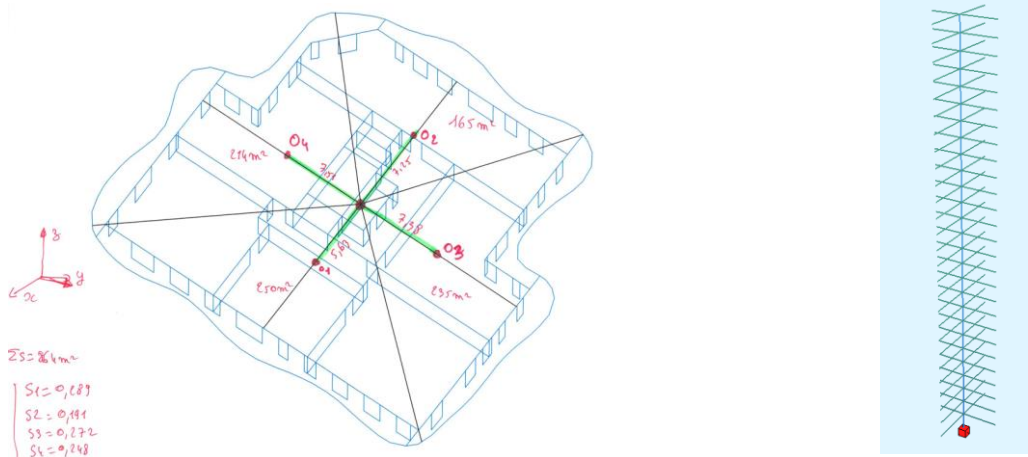
A.5.2 Solution 2 : modélisation de la 2eme tour par un modèle brochette

Nous avons réalisé un modèle brochette de la tour isolée.

Ce modèle est constitué d'une barre verticale modélisant le noyau dont les caractéristiques sont définies à partir de cas tests du modèle de la tour domaniale en disposant des charges horizontales en tête (selon X et Y) , puis en étudiant les inerties équivalentes produisant les mêmes déformations.

Compte tenu des dissymétries des planchers, il est apparu assez rapidement qu'une modélisation brochette classique en affectant les masses à chaque niveau ne convient pas, car les torsions ne sont alors pas prises en compte.

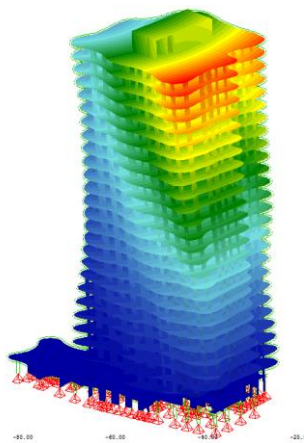
Chaque plancher a été découpé en 4 parties auxquelles sont affectées les masses correspondantes.



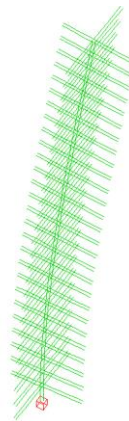
Visualisation du modèle brochette

Nous avons ensuite comparé et validé les torseurs résultants entre les 2 modèles de calcul sous les cas sismiques CQC, puis nous avons comparé les modes principaux.

mode 1 transversal selon X :

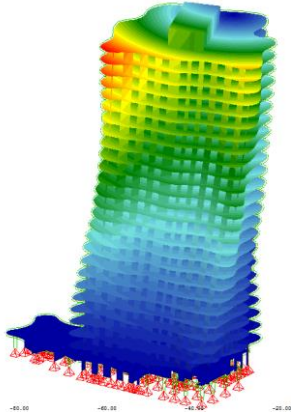


$f = 0.68$ Hz avec 56% des masses

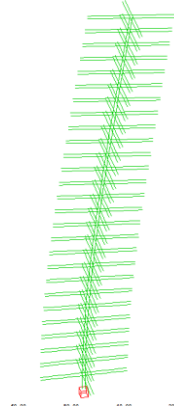


$f = 0.63$ Hz avec 62% des masses

Mode 2 : longitudinal Y :

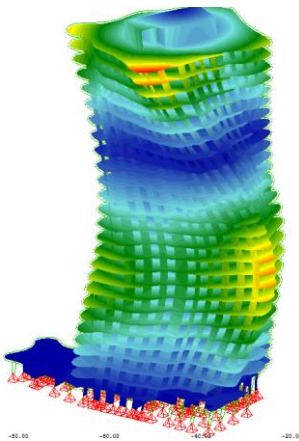


$f= 0.77$ Hz avec 66% des masses

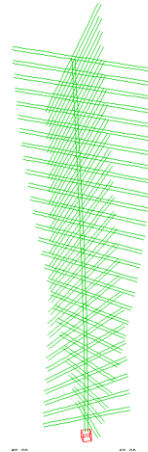


$f=0.70$ Hz avec 62 % des masses

Mode torsion :

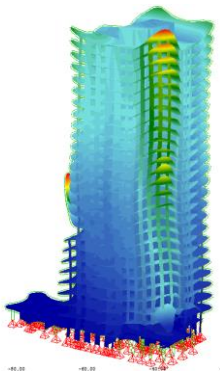


$f=2.2$ Hz

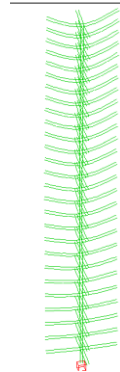


$f=1.3$ Hz

Mode de séisme vertical :



$f= 5.0$ Hz avec 73% des masses



$f=5.5$ Hz avec 82 % des masses

Le modèle brochette ainsi validé a été mis en place dans la modélisation générale en disposant des liaisons rigides entre la base de la brochette et les parois et barrettes porteuses de la grande fouille

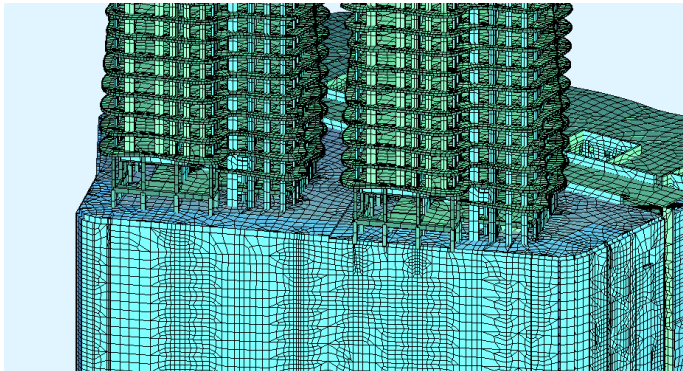
Il est apparu une diminution des efforts dans les parois moulées par rapport à la première solution. Par contre la liaison rigide a généré des efforts très importants non admissibles au niveau de la paroi moulée, qui n'apparaissent pas dans la liaison de la première tour.

Il faudrait donc modéliser en coque le premier niveau de la deuxième tour pour obtenir des résultats cohérents.

Cette solution a donc été abandonnée au profit de la troisième solution

A.5.3 [Solution 3 : modélisation de la 2eme tour entièrement par des coques](#)

C'est la solution que nous cherchions à éviter qui a été utilisée !! , les temps de calculs ont augmenté tout en étant respectable.



Vue arrière du modèle montrant l'ancrage de la 2eme tour dans la paroi moulée