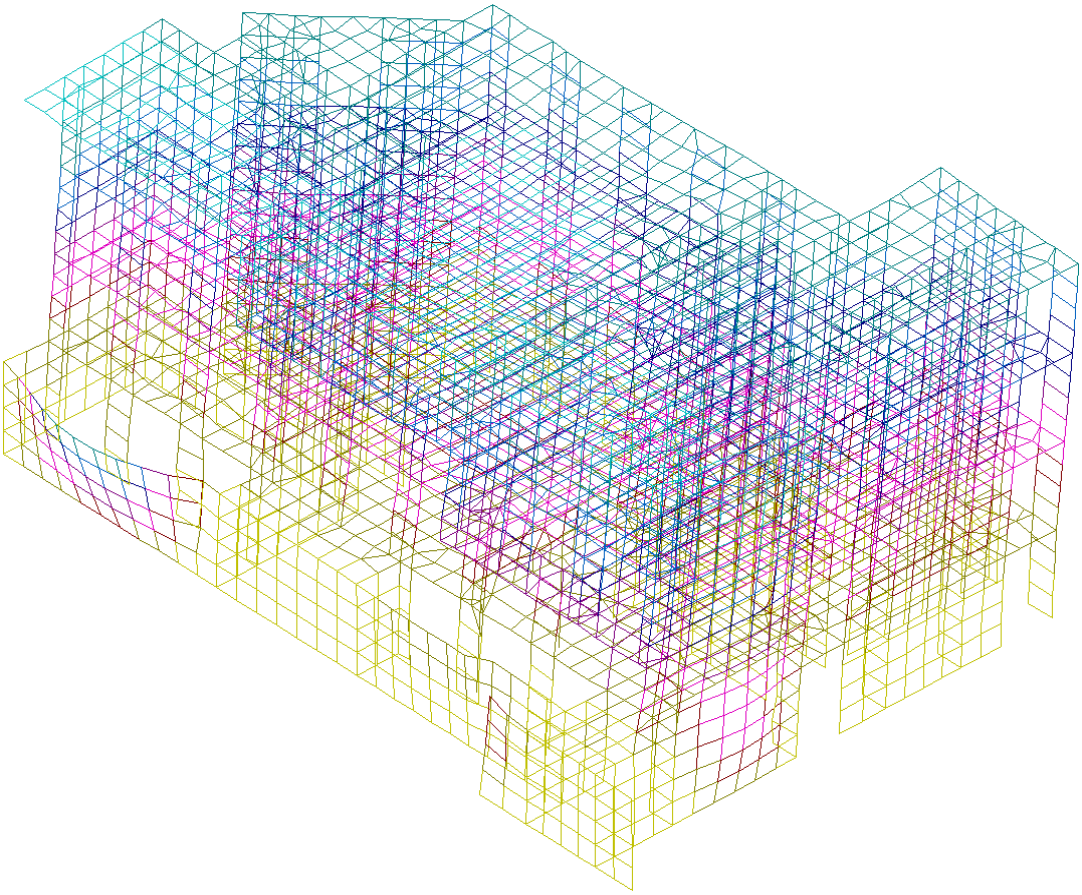
Département Génie Civil et Urbanisme
20 Avenue des Buttes de Coësmes
35 043 RENNES Cedex

Projet de fin d'études

Analyse comparative d'outils de calcul de structures en zone sismique



Soutenu par : Rémi FERNANDEZ

Responsable Pédagogique : Jean BACOT
Maître de stage : Alain BOUQUET

Le 24 juin 2004

AGIBAT Ingénierie
Les Bureaux de Chalin
20 Chemin Louis Chirpaz
69 134 ECULLY

Je tiens par cette page à remercier l'entreprise AGIBAT Ingénierie qui m'a fourni ce projet de fin d'étude.

Je remercie particulièrement messieurs BOUQUET, LECOADIC et LEMAITRE pour leur aide et le temps qu'ils ont bien voulu m'accorder.

Je remercie l'ensemble du personnel d'AGIBAT pour l'accueil qui m'a été fait dans l'entreprise.

Je n'oublierai pas de remercier monsieur HENIN, concepteur, développeur et éditeur du logiciel *Epicentre* pour sa grande sollicitude et sa disponibilité.

Je remercie également monsieur CHARDAT de la société Graitec, éditeur des logiciels *Arche Ossature* et *Effel*, qui a bien voulu répondre à mes questions.

Résumé

Ce rapport, que j'ai effectué au sein de l'entreprise AGIBAT Ingénierie, vise à aider cette entreprise quand au choix des méthodes a employer pour mener à bien une étude de structure en zone sismique.

Dans cette optique, trois logiciels sont comparés. Il s'agit pour les deux premiers logiciels édités pas la firme GRAITEC, *Arche Ossature* et *Effel.* Le troisième étant *Epicentre*, logiciel distribué par Michel HENIN.

Pour permettre la comparaison des outils on observera la rapidité, la précision des calculs, la facilité du post traitement, le coût et enfin la polyvalence de l'outil.

Le problème du post traitement consécutifs à l'analyse du bâtiment, et les calculs nécessaire au ferraillage des éléments est également abordé.

Mots clé :

Construction parasismique, Analyse modale, logiciel, fiabilité, rapidité, coût

Abstract

This report, that I carried out within the company AGIBAT Ingénierie, aims at helping this company when with the choice of the methods has to employ to conclude a study of structure in seismic zone

Accordingly, three software is compared. The two first software are published by the firm GRAITEC, *Arche Ossature* and *Effel.*. The third being *Epicentre*, is distributed by Michel HENIN.

To allow the comparison of the tool , speed, precision of calculations, facility of the post treatment, cost and finally versatility of the tool will be observed.

The problem of the post treatment consecutive the analysis of the building, and calculations necessary to the reinforcement of the elements is also presented.

Key Words

Parassismic construction, Modal Analysis, software, liability, speed, cost.

Sommaire

Résumé 3

Introduction 6

Chapitre 1 - Présentation de l'entreprise 7

1 Présentation générale 7

1-1 Historique 7

1-2 Caractéristiques administratives 7

2 Organisation de l'entreprise 8

2-1 Organigramme du bureau 8

2-2 Détail des services 8

3 Quelques réalisations de l'entreprise 10

3-1 Structure Métalliques 10

3-2 Structure Bois 12

3-3 Structure Béton Armé 14

3-4 Structures en toiles tendues 15

Chapitre 2 - Critères influant sur la prise de décision 16

1 Rapidité 16

2 Précision 18

3 Post Traitement 18

4 Coût 19

5 Polyvalence de l'outil 20

6 Hiérarchisation des différents critères de classement 21

Chapitre 3 - Analyse des outils 22

1 Présentation des méthodes de calcul 22

1-1 L'analyse modale spectrale 22

1-2 Le calcul réglementaire suivant le règlement PS 92 24

1-3 La méthode des éléments finis 28

1-4 La méthode de la matrice transfert 30

1-5 La méthode du centre de torsion. 32

2 Présentation des calculs utilisés comme référence 35

2-1 Analyse Statique 35

2-2 Analyse Dynamique 40

3 Présentation des logiciels utilisés 44

3-1 Arche Ossature 44

3-2 EFFEL 45

3-3 Epicentre 46

4 Etude comparative suivant les critères fixés 47
4-1 Arche Ossature 47
4-2 EFFEL 57
4-3 Epicentre 68
4-4 Synthèse des résultats sur l'ensemble des outils 84
Chapitre 4 - Développement du post-traitement 85
1 Calcul du ferraillage des voiles de contreventement 85
1-1 Rappel des combinaisons d'action 85
1-2 Vérification des contraintes normales 86
1-3 Vérification à l'effort tranchant 87
1-4 Exemple de calcul 90
2 Calcul de la poussée dynamique des terres 92
2-1 La poussée dynamique du sol non saturé 93
2-2 Poussée dynamique du sol saturé 94
2-3 Poussée dynamique du sol du à la surcharge 94
2-4 Exemple de calcul 95
Chapitre 5 - Exemple d'une note de calcul de structure en zone sismique 96
Conclusion 97
Bibliographie 98
Table des annexes : 99

Introduction

Si la survenance des séismes, pour la plus grande part, est encore un phénomène imprévisible, on ne considère plus, depuis quelques années comme inéluctable les catastrophes qu'ils sont susceptibles de provoquer. De ce fait, le comportement des construction sous une excitation dynamique est devenu un problème récurent auquel tout ingénieur en structure à déjà été confronté.

Conjointement, les progrès de l'informatique étant de plus en plus rapides, il devient possible de traiter des problèmes de plus en plus complexes. C'est dans ce cadre que le sujet de mon Projet de Fin d'Etude intervient. Il consiste à faire la comparaison entre plusieurs outils permettant le traitement des problèmes de dynamique des structures.

Après la présentation de l'entreprise qui m'a fournie ce projet, viendra le Chapitre 2 présentant les différents critères retenus pour effectuer la comparaison.

Le Chapitre 3 porte sur la comparaison à proprement parler. Une première partie présente l'ensemble des méthodes de calcul qui sont utilisées dans ce rapport, la seconde décrit les modèles qui sont utilisés pour ce calcul. Viennent ensuite la présentation des logiciels et les résultats des outils suivant les critères fixés.

Le Chapitre 4 présente quelques calculs particuliers nécessaires au post traitement et au dimensionnement des éléments principaux d'un bâtiment.

Enfin, en guise de cinquième et dernier chapitre, une note de calcul rédigée avec *Epicentre* permet d'avoir un aperçu du travail à fournir pour la justification d'une structure en zone sismique.

Chapitre 1 - Présentation de l'entreprise

1 Présentation générale

1-1 Historique

Crée en 1981, l'entreprise AGIBAT Ingénierie était à l'origine un bureau d'étude spécialisé dans l'étude des structures. Cette étude des structures a toujours été le centre de l'activité. Béton arme, béton précontraint, charpente métallique et constructions en bois font partie des compétences de l'entreprise.

Depuis 1990, à l'occasion de son rapprochement avec MTI, AGIBAT ajoute à ses compétences l'étude des structures en toiles tendues et devient AGIBAT MTI

En 2001, au cours de son intégration au groupement d'architectes et ingénieurs AIA, AGIBAT devient AGIBAT Ingénierie et développe en son sein un service d'économie du bâtiment, et d'études fluides et thermiques.

La structure est alors à son état actuel mais une politique de développement et d'agrandissement est en cours.

Le bureau emploie actuellement 31 personnes.

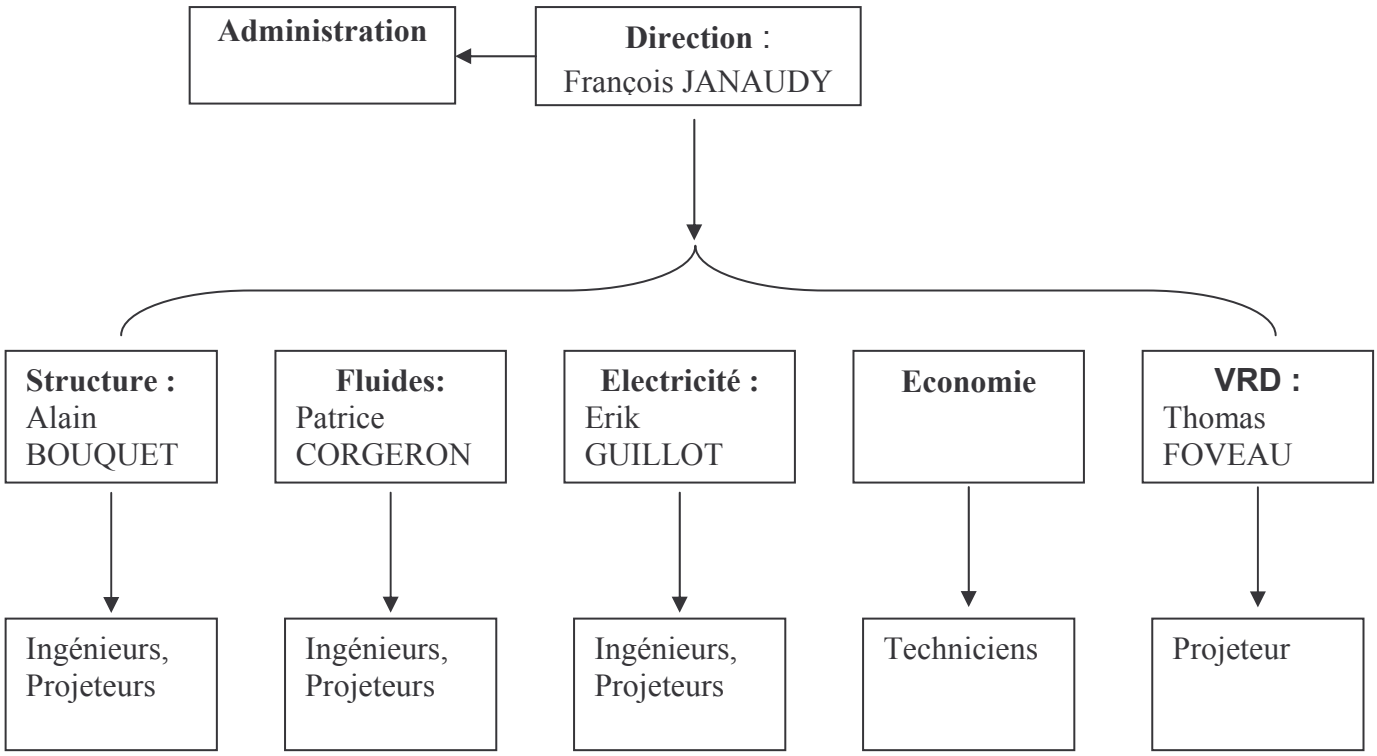
1-2 Caractéristiques administratives

Raison sociale	AGIBAT Ingénierie
Adresse	Les bureaux de Chalin
	20 Chemin Louis Chirpaz
	69 134 ECULLY Cedex
Registre du commerce	LYON B 411 976 871
SIREN	411 976 871
SIRET	411 976 871 000 29
APE	742 C

AGIBAT Ingénierie est une Société Anonyme simplifiée au capital de 127 500 €.

2 Organisation de l'entreprise

2-1 Organigramme du bureau



2-2 Détail des services

a) Structure

Le calcul de structures est le pole principal d'AGIBAT Ingénierie.

AGIBAT Ingénierie n'est pas résolue à une seule technique de construction. La créativité de l'architecte peut s'exercer dans l'ensemble des matériaux traditionnels tels que le bois, la charpente métallique et le béton, mais aussi des constructions plus « HI TECH » telles que les structures en toiles tendues, en réseaux de câbles, les résilles tridimensionnelles, …

Pendant la réalisation des travaux, comme pendant les phases de conception, les ingénieurs de l'entreprise suivent de près les dossiers qu'ils ont en charge notamment au moyen d'une présence sur les chantiers. C'est une bonne garantie quand à la fidélité au projet initial.

b) Electricité et Fluides

Le rattachement d'AGIBAT Ingénierie à la société CERA, une des structures du groupe AIA, fait des fluides un pole de compétences particulièrement appréciées lors de réalisation d'ouvrages complexes tels que des cliniques, des centres de Balnéothérapie ou des laboratoires.

Les compétences présentes au sein d'AGIBAT Ingénierie sont très diverses. On notera cependant la synthèse suivante :

- Le conditionnement d'air de blocs opératoires, de salles blanches et de laboratoires.
- Les processus de piscines et de centres de Balnéothérapie,
- Les fluides médicaux,
- La gestion des réseaux de courant faibles et de courants forts

c) Administration

L'administration regroupe chez AGIBAT deux postes. Un premier poste est en charge du volet financier de l'entreprise et de la comptabilité, tandis que le second a plus la charge du secrétariat.

d) Economie

L'économiste de la construction participe à l'élaboration du projet de construction pour le maître d'œuvre ou le maître d'ouvrage. Il estime les coûts de l'ouvrage.

Il peut notamment intervenir pour le choix des matériaux des techniques de réalisation lors de la conception.

De façon plus générale, l'économiste travaille à la réalisation des pièces écrites présentes dans les marchés de travaux. Cela comporte des pièces techniques (CCTP, Métré, étude de prix) et des pièces administratives (CCAP, Appel d'offre, Comptabilité de chantier).

Il peut aussi être amené à exercer certaines activités pour la conduite générale des travaux telles que la planification des réunions, planification des travaux, vérification des factures mensuelles.

e) VRD

La conception des réseaux et des voiries sur un projet implique une bonne communication avec les services publics ou concédés ainsi qu'avec tous les acteurs intervenant sur le site.

3 Quelques réalisations de l'entreprise

3-1 Structure Métalliques

➢ *Infogramme*

Maître d'Ouvrage :	Sogelym - Steiner Lyon
Architecte :	Sud Architecture
Bureau d'Etudes :	AGIBAT INGENIERIE
Mission :	Conception + Exécution
Montant TCE :	100 MF HT pour 15 000 m² de bureau
Livraison :	Juin 2001

Vue extérieure

Allée couverte en toile tendue

Structure mixte Poutres métalliques – Plancher béton

- *Gymnase Vivier MERLE*

Maître d'Ouvrage :	Ville de Lyon
Architecte :	Jean CHABANNE
Bureau d'Etudes :	AGIBAT INGENIERIE
Mission :	Conception + Exécution
Montant TCE :	17 MF
Livraison :	Septembre 2000

Vue Extérieure

Vue Intérieure

3-2 Structure Bois

➢ *Place du 8 mai*

Réalisation d'un marché couvert, structure en bois massif et lamellé collé, avec une couverture en verre sérigraphié.

Maître d'Ouvrage :	COMMUNAUTE URBAINE DE LYON
Architecte :	FRANCOISE JOURDA
Bureau d'Etudes :	AGIBAT INGENIERIE
Mission :	Conception + Exécution
Montant estimé :	
Livraison :	ETE 2001

Détail d'un poteau

Vue d'ensemble

- *Centre Jean Marie TJIBAOU*

Le centre Jean-Marie TJIBAOU se situe au Nord de Nouméa. Créé par l'architecte Renzo Piano, il reprend les formes symboliques des cases kanakes.

C'est un lieu d'échange des cultures océaniennes qui s'étend sur 7000m2. Le centre est composé de 10 cases reliées entre elles par un axe central, un "couloir".

L'espace créé est utilisé pour mettre à la disposition du public des milliers d'ouvrages, de documents sonores, audiovisuels, photographiques, des thèses, des mémoires, etc.

Le centre est constitué de 10 cases en bois lamellé collé, d'un théâtre et de différents équipements annexes.

AGIBAT INGENIERIE a fourni la totalité des études de structure bois - métal des cases, qui doivent résister aux vents cycloniques

Maître d'Ouvrage :	SECAL
Architecte :	RENZO PIANO
Bureau d'Etudes :	AGIBAT INGENIERIE
Mission :	Conception + Exécution
Montant TCE :	200 MF HT
Livraison :	Mai 1998

Vues du centre Jean Marie TJIBAOU

3-3 Structure Béton Armé

➢ *Poste de transformation EDF*

Sur une infrastructure traditionnelle en Béton Armé, le volume hors du sol est constitué par une coque mince (10 à 12 cm) en Béton Armé représentant la forme d'un galet du Rhône - Portée : 32 x 50 m.

Réalisation en Béton Projeté sur une ossature mise en forme par roulage des barres d'acier. Revêtement extérieur en pierres collées sur une étanchéité élastomère.

Maître d'Ouvrage :	EDF
Architecte :	RENZO PIANO + Archigroup
Bureau d'Etudes :	AGIBAT INGENIERIE
Mission :	Conception + Exécution
Montant TCE :	18.5 MF HT
Livraison :	Mai 1997

Vues du poste de transformation

3-4 Structures en toiles tendues

➢ *Port de Papeete*

Couverture du quai d'honneur des bateaux de croisière.

Maître d'Ouvrage :	Le port autonome de Papeete
Architecte :	René LACOMBE
Bureau d'Etudes :	AGIBAT INGENIERIE
Mission :	Conception + Exécution 600 m²
Montant TCE :	2 MF HT
Livraison :	Décembre 1999

Structure métallique associée à de la toile tendue.

Chapitre 2 - Critères influant sur la prise de décision

Ce projet de fin d'études vise à aider un bureau d'étude à faire un choix portant sur l'utilisation des outils de calculs pour l'étude des structures en zone sismique.

Pour réaliser l'étude comparative des différents logiciels, il est nécessaire de se fixer les critères qui vont nous guider dans l'étude.

1 Rapidité

La rapidité est un des critères les plus importants pour le travail d'un ingénieur. Ce critère conditionne en grande partie le coût d'étude d'un projet. Dans certains cas extrêmes, il peut être un frein à l'activité d'une entreprise. Une entreprise peut être amenée à refuser des offres d'études faute de temps pour les traiter.

Il est donc nécessaire pour une entreprise de maîtriser le temps passé sur des études. En cela, je vais essayer d'évaluer le critère temporel des différents outils mis en compétition.

On pourra, pour chaque étape qui compose la rédaction de la note de calcul finale, évaluer le temps passé sur chacune des étapes :

- *Rapidité de construction du modèle,*
- *Rapidité de calcul*
- *Rapidité de production de la note de calcul et de la synthèse des résultats.*

On notera cependant que la notion de rapidité d'un logiciel (en dehors de la rapidité de calcul et de traitement des données) est variable et dépends de plusieurs paramètres. On en retiendra que deux paramètres principaux pouvant influer sur la rapidité.

Pour une partie technique pure, la rapidité va varier en fonction de la configuration de l'ordinateur utilisé pour les calculs. Cependant ce critère ne sera pas décisif dans le cadre de cette étude car tous les calculs sont réalisés avec la même machine. On n'aura pas donc entre deux calculs différents des temps faussés par la puissance de la machine puisque celle-ci est identique pour tous les calculs.

Un autre critère qui influe sur le critère de rapidité est l'utilisateur. Si l'utilisateur a une grande maîtrise d'un outil, il va nécessairement passer moins de temps que son collègue qui en a moins l'usage. Ce paramètre « d'habitude » du logiciel est en fait grandement lié à la simplicité de l'outil. Au plus l'outil est simple dans son ensemble, au moins l'habitude de l'utilisateur aura un rôle dans l'étude.

Pour évaluer la rapidité de saisie, on utilise un modèle relativement complexe dans sa géométrie.

Il s'agit d'un bâtiment de bureaux, situé en Savoie, dans la banlieue de Chambéry. Le bâtiment est composé de 7 niveaux, dont 4 sont identiques.

On peut faire 4 groupes d'étages pour cette structure. Le rez de chaussée, les étages R+1 à R+4, le R+5 et le R+6.

On voit sur la vue suivante que cette structure n'est pas identique sur tous les étages.

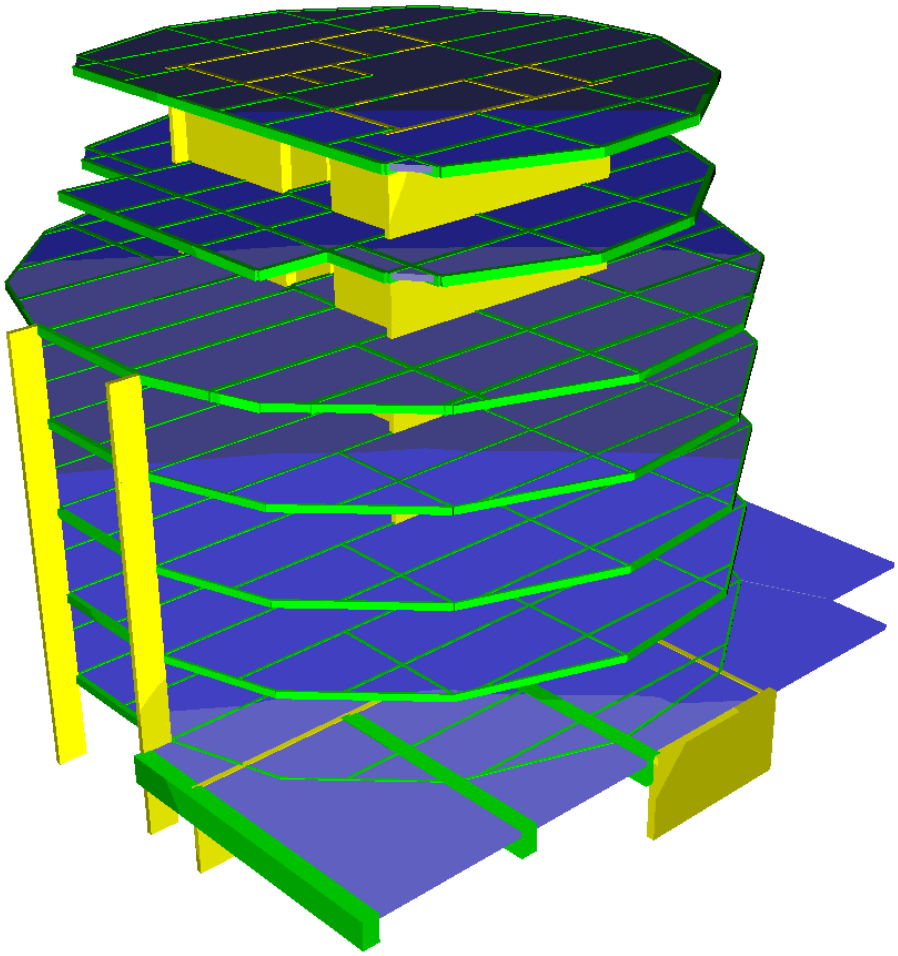


Figure 1 : Perspective de la tour Galbert

Sur cette vue les poteaux qui supportent la charpente métallique ne sont pas représentés pour plus de clarté.

Pour la rapidité de calcul et de rédaction, on effectue la comparaison sur le modèle qui est présenté dans le Chapitre 3 au paragraphe 2-2 page 40.

2 Précision

- *Précision de la répartition des efforts.*

Pour évaluer la méthode de répartition des efforts entre les éléments d'une structure, on va réaliser un calcul manuel de contreventement. On évaluera la pertinence des caractéristiques mécaniques dans le cas d'*Epicentre* et de la répartition des efforts dans le cas d'*Epicentre* et d'*Effel*.

- *Précision de l'analyse modale*

La précision de l'analyse modale est quelque chose de relativement complexe à évaluer. En effet, pour un bâtiment traditionnel, les calculs de l'analyse modale sont longs et complexes à traiter manuellement. De façon générale, les problèmes à plus de 5 degrés de liberté, de par la nature des calculs à mener (détermination des fréquences propres), ne peuvent être traités de façon analytique. Il devient alors indispensable de procéder à un calcul numérique itératif qui par son fondement est plus ou moins approximatif.

Pour tester la validité des outils utilisés, je comparerai donc les résultats fournis par chaque outil entre eux.

3 Post Traitement

Le post traitement englobe toutes les étapes qui interviennent après les phases de calcul. Il englobe la facilité de rédaction de la note de calcul qui va être diffusée auprès des bureaux de contrôle ou des entreprises qui souhaitent répondre à une offre lors d'un DCE[1] mais aussi les phases de post calcul qui vont permettre le dimensionnement des éléments qui vont participer à la résistance de la structure aux efforts dynamiques.

- *Intégration des résultats aux outils de calcul de post traitement.*

Une fois l'analyse modale finie, il est nécessaire de réaliser un dimensionnement des éléments de la structure. Les outils qui réalisent les calculs dynamiques de l'analyse modale sont généralement différents de ceux qui permettent à posteriori le dimensionnement des éléments constituant l'ouvrage étudié.

Il est donc nécessaire de recourir à divers outils de post traitement pour réaliser le dimensionnement de la structure à partir des efforts statiques d'une part et des efforts dynamiques d'autre part.

1 : Dossier de Consultation des Entreprises.

La présence de tels outils de dimensionnement est importante. De fait, il est très intéressant qu'un outil qui permette la détermination des efforts sur une structure soit couplé avec un outil de dimensionnement. De cette façon on saura très rapidement si la structure est correctement conçue ou non. De plus on peut, dans des phases plus avancées du projet aboutir à des résultats plus rapidement.

4 Coût

On distingue plusieurs paramètres plus ou moins directs dans l'évaluation du coût de l'acquisition du logiciel. Outre le coût d'achat des licences, il est nécessaire d'inclure le coût du contrat de maintenance et d'assistance du produit et le coût de la formation du personnel à l'outil en question.

- *Coût des licences*

Les licences sont fournies par les éditeurs de logiciels. Elles sont généralement relativement chères et leur coût peut varier en fonction du nombre de licences déjà acquises, de la demande, de la négociation du prix. Pour cette étude, le choix de licence qui sera fait est une licence unique du produit, avec une protection locale (par opposition aux protections réseau).

- *Coût des mises à jour*

Les mises à jour des produits sont nécessaires pour maintenir un produit en bon état de marche. En effet, la correction d'erreurs dans le code, l'évolution de la réglementation, le développement de nouvelles options de calcul sont intégrées dans les packs de mise à jour des logiciels qui sont fournis moyennant rémunération par l'éditeur du logiciel. Ces mises à jour sont souvent très utiles car les outils sont en constante amélioration

- *Coût de la formation du personnel aux outils*

La formation du personnel aux outils de calcul et éventuellement aux méthodes de calcul de structure est aussi une source de dépenses importantes pour l'entreprise. Le critère de formation sera différent en fonction des outils présents.

La durée de formation à chacun des outils à été déterminée avec le conseil des éditeurs de logiciels.

5 Polyvalence de l'outil

La polyvalence de l'outil est fonction du nombre de structures qui ne pourront pas être traitées avec un des outils.

Le panel des possibilités s'étend du calcul particulier de contreventement en statique ou en dynamique pour des structures uniquement contreventées par des panneaux au calcul complet d'une structure mixte béton armé / charpente métallique à contreventement mixte Portique / Panneaux. On peut donc dégager trois paramètres composant la polyvalence des outils

- ➔ *Le type de contreventement pris en compte*
- ➔ *Les matériaux utilisables*
- ➔ *Les directions de calcul possibles dans l'analyse modale.*

Par la méthode qui est employée pour réaliser le calcul dynamique, certains bâtiments peuvent ou ne peuvent pas être étudiés avec tous les outils.

On va attribuer les « notes » de polyvalence suivant les trois paramètres précités :

Type de contreventement	Points
Contreventement par voile	1
Contreventement Mixte	2

Tableau 1 : Les types de contreventement possibles

Les matériaux employables	Points
Béton uniquement	1
Structures mixtes	2

Tableau 2 : Matériaux employables dans le modèle

Directions de calcul	Points
Une direction	1
Deux directions	2
Trois directions	3

Tableau 3 : Directions de calcul de l'analyse modale

La note de polyvalence sera la somme des points obtenus pour chacun des paramètres de polyvalence.

6 Hiérarchisation des différents critères de classement

Cela permet par exemple de répondre à la question vaut-il mieux avoir un logiciel rapide ou un logiciel peu cher ?

Le poids que l'on affecte aux différents critères pris en compte est un élément important de la méthode de classement, aussi, une grande réflexion est portée sur la hiérarchisation des différents critères.

Les poids affectés aux différents critères sont regroupés dans le tableau suivant :

Critère	Poids
Rapidité	3
Précision	1
Post Traitement	2
Coût	2
Polyvalence	1

Tableau 4 : Poids des différents critères

Le coût, la rapidité et la facilité de post traitement sont des critères prépondérants pour des raisons de productivité, ils interviennent directement dans le coût pour l'entreprise de l'étude. Ces paramètres, s'ils sont mauvais, peuvent à terme nuire à la productivité de l'entreprise.

La précision est des paramètres moins importants dans le sens ou ils n'interviennent pas directement sur le coût de l'étude pour une entreprise. On aurait cependant pu penser dans un premier temps que la précision soit le critère le plus important. Dans le cas de l'analyse dynamique des structures, les résultats étant tellement aléatoires, se comportant parfois comme systèmes chaotiques, j'ai choisi de ne pas accorder une trop forte importance à ce critère, n'étant pas parfaitement convaincu de la fiabilité des calculs menés.

La polyvalence est classée en dernière position car elle n'entraîne qu'une faible incidence sur le fonctionnement de l'entreprise.

Chapitre 3 - Analyse des outils

1 Présentation des méthodes de calcul

Les logiciels étudiés présentent différentes méthodes de calcul. *Arche Ossature* et *Effel* utilisent la méthode des éléments finis pour le calcul des efforts et la modélisation de la structure. A contrario, optant pour une modélisation plus légère, *Epicentre* utilise la méthode des matrices de transfert pour déterminer les efforts dynamiques appliqués à chaque degré de liberté et la méthode du centre de torsion pour répartir les efforts entre les voiles d'un même étage.

1-1 L'analyse modale spectrale

Cette analyse est indispensable pour le traitement des structures classées comme étant irrégulière au sens de l'article 6.6121 et 6.6131. Cette méthode dont l'objectif est la détermination des périodes propres, permet de caractériser la réponse du bâtiment à un chargement dynamique.

L'analyse dynamique d'un bâtiment repose sur les hypothèses suivantes :

- La réponse d'une structure est prépondérante au voisinage des fréquences propres dite « de résonance » de la structure
- Le comportement global de la structure est une superposition de chacun des modes propres.

L'analyse modale spectrale se déroulera donc de la façon suivante :

- Recherche des modes propres de la structure,
- Sélection des modes qui jouent un rôle prépondérant lors d'un séisme,
- Combinaison des réponses modales.

a) La recherche des périodes propres

Par la définition des modes propres, il existe autant de modes propres et de période propre associée que de degré de liberté. Aussi, le nombre de degré de liberté étant en général élevé, le calcul est souvent relativement long.

On se limitera de façon générale à un nombre maximal de 100 modes propres. Cette limitation est imposée par deux critères. Le premier étant technique car pour rendre les temps de calcul convenables, on ne peut imaginer des temps de calcul excédant une heure.

La seconde limitation est réglementaire. Les règles PS 92 imposent à l'article 6.622 une fréquence maximale de 33 Hz pour limiter le nombre de modes propres à prendre en compte pour l'analyse modale.

b) Sélection des modes propres

La sélection des modes propres s'effectue (lorsque c'est possible) par l'intermédiaire de la masse modale. Les modes dits « globaux » par opposition aux modes « locaux » ont une masse modale qui est plus importante. On retrouve souvent l'information d'importance du mode en exprimant le ratio entre la masse modale du mode considéré et la masse totale du modèle.

Les modes globaux mettent en mouvement l'ensemble de la structure tandis que les modes locaux n'intéressent que certains degrés de liberté de la structure. Par définition de la masse modale, ils jouent un rôle négligeable vis-à-vis de l'ensemble de la structure. Par contre, dans le cas de l'étude de sous systèmes, ils peuvent jouer un rôle beaucoup plus important.

Pour mieux comprendre ce phénomène de mode local et de mode global, on peut prendre l'exemple d'une antenne placée sur le toit d'un immeuble. Même si cette antenne est relativement lourde, sa mise en vibration, indépendamment du reste de la structure, est pour l'ensemble de l'édifice assez peu important comparé aux modes qui vont intéresser les étages inférieurs. Par contre pour ce qui est de l'antenne elle-même, ce mode local peut être dimensionnant. On a une illustration de la différence entre modes locaux et modes globaux sur les Figure 4 et Figure 5 page 29.

C'est pour cette raison qu'il faut prêter une grande attention à l'analyse modale et à la sélection des modes propres.

c) Combinaison des réponses modales

On trouve dans l'article 6.623 des règles *PS 92* l'exigence en matière réglementaire sur les combinaisons des différents modes.

La combinaison des réponses modale s'effectue en général de deux façons.

Lorsque les modes que l'on veut combiner entre eux ont des fréquences propres clairement séparées, il est possible de faire un cumul quadratique des actions ou des efforts découlant des actions au moyen de la formule suivante : $X = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}$

Où X est la grandeur que l'on veut combiner entre différents modes et X_i la réponse pour chacun des modes.

Cette première méthode de superposition des effets des différents modes est appelée méthode SRSS[1]

Lorsque, au contraire, les modes se produisent avec des fréquences propres voisines, on ne peut plus utiliser cette superposition quadratique. On utilise alors une méthode de superposition qui tienne compte de la possibilité d'avoir une réponse qui fasse intervenir de façon concomitante deux modes différents. Cette méthode de combinaison est une méthode de combinaison dite CQC[2].

On combine les effets des différents modes par la méthode CQC de la façon suivante :

Dans un premier temps on définit un facteur ρ de dépendance et β_{ij} un facteur de corrélation entre les modes *i* et *j*.

$$\rho = \frac{T_i}{T_i} \qquad \beta_{ij} = \frac{8\zeta^2(1+\rho)\rho^{3/2}}{10^4(1-\rho^2)^2 + 4\zeta^2\rho(1+\rho)^2}$$

ζ est l'amortissement de la structure. On suppose dans ce calcul que l'amortissement est identique pour chacun des modes propres. Cette hypothèse reste valable tant que la structure n'est composée que d'un seul matériau.

La superposition entre les différents modes qui ne sont pas indépendants se fait alors de la façon suivante : $X = \sqrt{\sum_{i,j=1}^{n} \beta_{ij} X_i X_j}$

On remarque que la combinaison SRSS n'est qu'un cas particulier de la combinaison CQC dans le cas ou tous les modes sont indépendants.

1-2 Le calcul réglementaire suivant le règlement PS 92

Le calcul réglementaire se déroule en plusieurs phases qui visent dans un premier temps à définir le séisme à prendre en compte pour le calcul. Dans un second temps, on effectue l'analyse de la réponse de la structure sous le chargement dynamique du séisme réglementaire. Dans un dernier temps, on effectue le post traitement qui consiste à vérifier la résistance des éléments sous l'effet du chargement dynamique.

[1] : Square Root of the Sum Square : Racine carrée de la somme des carrés aussi appelée combinaison quadratique.

[2] : Combinaison Quadratique Complète.

a) Définition du séisme de calcul

Le séisme de calcul est défini en fonction de plusieurs paramètres. Certains de ces paramètres sont inhérents au site dans lequel la construction est envisagée, les autres paramètres sont fonction de la destination de l'ouvrage.

La situation géographique combinée avec la classe de l'ouvrage conditionne l'accélération nominale du séisme. On peut voir sur le Tableau 5 ci-dessous la valeur de l'accélération nominale. Les classes de bâtiment sont définies dans l'annexe 2 des règles *PS 92*. On les rappelle succinctement :

Classe A : Ouvrages dans lequel il n'y a pas de séjour prolongé des personnes

Classe B : Habitations, Bureaux, locaux à usage commercial

Classe C : Etablissements d'enseignement, sales de spectacle, ERP de 1ere, 2eme et 3eme catégorie.

Classe D : Hôpitaux, casernes, centres de télécommunication, musées, …

	Classe de l'ouvrage		
Zone	B	C	D
Ia	1	1.5	2
Ib	1.5	2	2.5
II	2.5	3	3.5
III	3.5	4	4.5

Tableau 5 : Accélération nominale du séisme réglementaire

Il n'est pas nécessaire de faire de calcul sismique d'une structure se trouvant en zone 0 ou étant de catégorie A en zone sismique.

Les différentes zones géographiques sont définies réglementairement par les pouvoirs publics. On retrouve sur Figure 2 page suivante la répartition des différentes zones sur l'ensemble du territoire français.

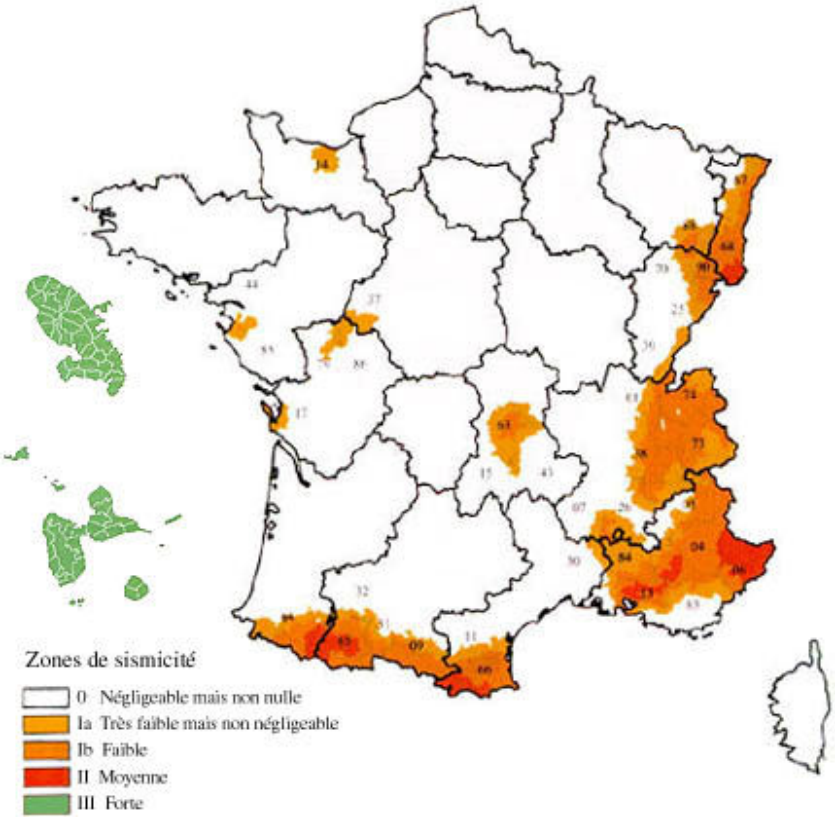


Figure 2 : Zonage sismique de la France

b) *Calcul dynamique de la structure*

Pour les bâtiments réguliers ou moyennement régulier au sens du règlement *PS 92* (définition aux articles 6.61), on peut effectuer le calcul de la réponse de la structure en utilisant une méthode simplifiée. Cette méthode se repose sur une estimation de la déformée du mode propre fondamental d'un modèle brochette.

De cette façon, on peut alors, connaissant la masse de chacun des planchers, convertir les forces d'inertie dues à un séisme en une superposition d'efforts statiques appliqués aux planchers de la structure. La répartition des efforts appliqués par les planchers se fera sur les différents voiles avec la méthode du centre de torsion par exemple.

Dans le cas des bâtiments n'étant pas réguliers ou moyennement réguliers, le règlement impose une analyse modale spectrale. Cette analyse modale spectrale se fait généralement à l'aide d'un outil informatique, d'où le sujet de ce rapport.

c) Vérification des éléments de la structure

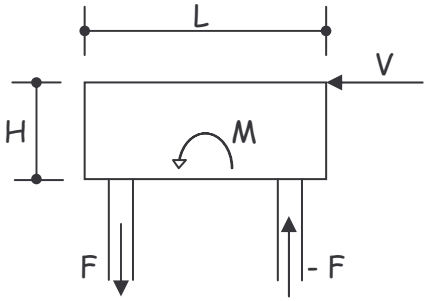
Les calculs de vérification des éléments de la structure sont exposés au Chapitre 4.

De façon générale, on vérifiera pour une structure en zone sismique l'ensemble des éléments dits principaux. Les éléments définis comme principaux au sens du *PS 92* sont les éléments qui « interviennent dans la résistance de la structure au séisme ».

Le cadre de cette étude se limitant aux logiciels de calcul de structures en zone sismique contreventées par voiles, on ne s'intéressera qu'aux voiles de contreventement.

Il est cependant possible, même dans le cas des structures contreventées par des voiles d'avoir des éléments autres que des voiles principaux. Les poteaux et les poutres supportant des éléments principaux seront eux aussi classés comme principaux.

Dans le cas d'Epicentre, il est par exemple possible de saisir des poteaux qui supportent les voiles. Ces poteaux ne participent pas au contreventement dans le sens où, étant articulés à chacune de leur extrémité, ils ne reprennent que des efforts normaux de traction compression qui sont dus à des efforts sismiques. Ils sont donc principaux.



$$M = V \cdot H$$

$$F = \frac{M}{L}$$

Figure 3 : Exemple de poteaux principaux

Comme le sujet du rapport concerne les structures contreventées par voiles, seuls les calculs qui intéressent les voiles seront exposés. Il s'agit du calcul et de la vérification du ferraillage des voiles de contreventement ainsi que le calcul des voiles situés en infrastructure qui font office de voiles de soutènement.

1-3 La méthode des éléments finis

La méthode de calcul aux éléments finis repose sur une discrétisation d'un modèle continu en plusieurs éléments de taille réduite.

Chaque élément possède des « nœuds » qui possèdent à leur tour un ou plusieurs degrés de liberté.

Cela permet de traiter de façon numérique des problèmes à géométrie complexe.

Pour réaliser une étude dynamique, il est nécessaire de comprendre que les forces mises en jeu sont de nature inertielle. Elles interviennent uniquement sur les masses présentes dans le modèle. La discrétisation de la masse va donc jouer un rôle important dans la compréhension du fonctionnement de notre modèle.

On peu donc penser au premier abord qu'une répartition continue de la masse est la meilleure solution. Ce n'est en fait pas tout à fait la vérité. Certes une répartition continue de la masse fournit un modèle qui est le plus proche de la réalité cependant les outils nécessaires pour le traitement d'un tel cas sont trop « lourds » pour pouvoir envisager leur utilisation de façon rationnelle dans un bureau d'étude.

C'est pourquoi les éléments finis, qui permettent une discrétisation de la masse en chacun de nœuds qui composent le modèle est une solution qui permet (si le maillage est correct) le traitement de modèles complexes avec une relative bonne précision.

Cependant, cette répartition de la masse sur l'ensemble de la structure a une conséquence qui n'est pas bonne du point de vue de l'analyse globale du comportement dynamique du bâtiment. En effet, chaque élément modélisé est pris en compte lors de l'analyse dynamique. Cela donne souvent naissance à des modes de vibration dits locaux qui n'intéressent qu'un seul élément de la structure.

On peut voir sur les figures ci-dessous la différence qu'il existe entre mode local et mode global de vibration.

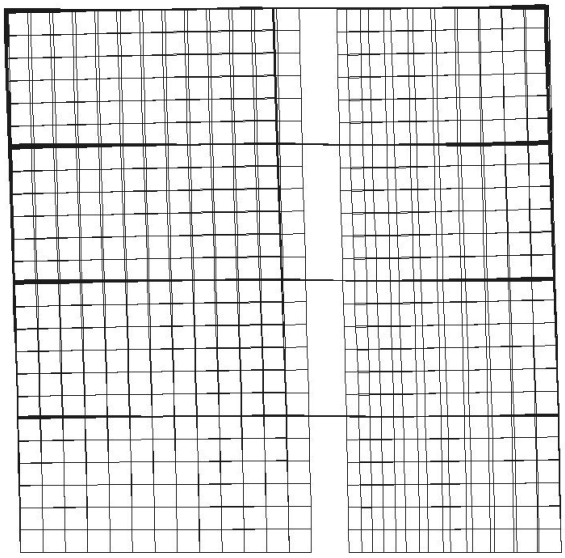


Figure 4 : Illustration d'un mode Global

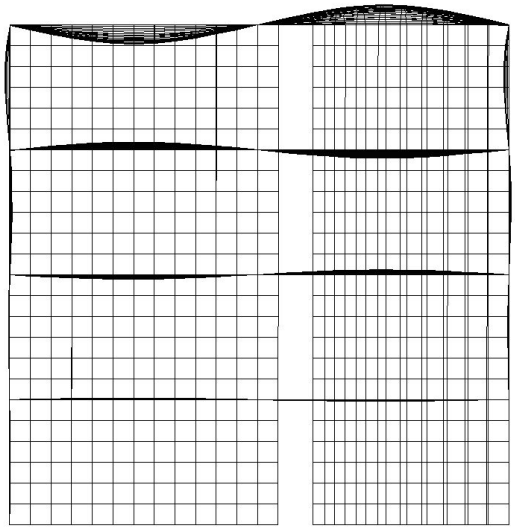


Figure 5 : Illustration d'un mode Local

Ces modes locaux ne sont pas en soi nuisibles pour le calcul de la sollicitation dynamique sur la structure mais ils ne servent « quasiment » à rien. La masse modale qu'ils représentent est négligeable par rapport à la masse modale d'un mode de vibration global. On peut donc se demander dans ce cas à quoi bon dépenser du temps de calcul qui finalement est si précieux ?

Cette modélisation du bâtiment en un grand nombre de nœuds de maillage est finalement pratique car elle permet la création de modèles complexes et s'approchant le mieux possible du comportement réel de la structure. Cependant elle nécessite des moyens qui sont souvent lourds à mettre en place et qui impliquent des temps de calcul relativement longs.

1-4 La méthode de la matrice transfert

Cette méthode permet le traitement de façon numérique le calcul du contreventement des systèmes mécaniques.

a) Le vecteur d'état d'une section de cote z

$Cxyz$ est le repère principal du système formé par les *m* voiles de la tranche $[i, i+1]$

$E(z)$ est le vecteur d'état du niveau de la tranche comprise entre les cotes $[z_i, z_{i+1}]$ dans le bâtiment. Le vecteur E possède $12 + 2 \cdot m$ composantes et est défini de la façon suivante :

$$E(z) = (v_x, v'_x, M_y, T_x, v_y, v'_y, M_x, T_y, \theta, \theta', B, H, u_1, N_1, \ldots, u_j, N_j, \ldots, u_m, N_m)$$

Avec :

v_x, v'_x, M_y, T_x : Paramètres de flexion d'ensemble dans le plan Cxz

v_y, v'_y, M_x, T_y : Paramètres de flexion d'ensemble dans le plan Cyz

θ, θ', B, H : Paramètres de torsion d'ensemble autour de Cz

u_j, N_j : Paramètres de Traction Compression du voile *j* ($1 \leq j \leq m$)

b) Les Matrices Transfert

Cette méthode, assez complexe, se base sur un concept de « passage » d'un niveau du bâtiment à un niveau supérieur en utilisant une matrice de transfert $M_{i,i+1}$ de la façon suivante :

$$E(z_i) = M_{i,i+1} \cdot E(z_{i+1})$$

On peut aussi construire des matrices de transfert qui permettent de passer non plus des tranchez régulières de niveau, mais des niveaux qui comportent des irrégularités telles que des linteaux, des appuis entre voiles superposés, des liaisons rigides entre voiles….

Par exemple si le niveau z_i comporte des linteaux, on construira la matrice M_{zi} telle que

$$E(z_{i+}) = M_{zi} \cdot E(z_{i-})$$

c) Résolution du problème

Par un cheminement successif depuis la base vers le sommet du bâtiment, en prenant en compte chacune des irrégularités, on peut obtenir le système linéaire suivant :

$$E(h) = M \cdot E(0)$$

Ou h est la hauteur totale du bâtiment et M le produit de chacune des matrices de transfert depuis le niveau des fondations jusqu'au dernier niveau.

On a donc un système linéaire à $12+2\cdot m$ équations. Les composantes des deux vecteurs E(h) et E(0) sont cependant inconnues. Il y a donc $24+4\cdot m$ inconnues. Les $12+2\cdot m$ équations supplémentaires nécessaires à la résolution du système linéaire sont obtenues en appliquant les conditions aux limites qui sont en général : efforts nuls au sommet de la structure et déplacements nuls au pied de la structure

Une fois que l'on à résolu ce système d'équations, on peut alors calculer les efforts, contraintes et déplacements à chacun des niveaux en utilisant les matrices de transfert et les composantes du vecteur d'état de la section considérée.

Il faut cependant noter que ce paragraphe n'est qu'une présentation de la méthode et que pour plus de renseignements on peu se référer à l'Annexe 1 pour un exposé plus complet.

1-5 La méthode du centre de torsion.

La méthode du centre de torsion est une méthode qui permet de répartir les efforts horizontaux appliqués par un élément infiniment rigide à un ensemble de voiles.

C'est cette méthode qui est notamment utilisée dans le calcul statique pour la validation de la répartition des efforts. C'est aussi la méthode utilisée par le logiciel *Epicentre* pour calculer la répartition des efforts de vent ou de séisme entre les différents voiles.

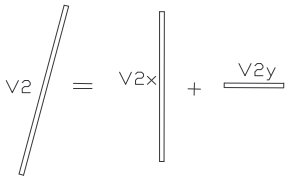
- *Caractéristiques mécaniques des voiles*

Les caractéristiques mécaniques des voiles sont les inerties et la position du centre de torsion.

- Voiles rectangulaires

Pour les voiles rectangulaires, l'inertie est simplement $I_x = \frac{th^3}{12}$ et $I_y = \frac{ht^3}{12}$ et le centre de torsion est confondu avec le centre de gravité.

Lorsqu'un voile rectangulaire est incliné d'un angle $\varphi \neq 0$ par rapport aux directions principales du problème, on peut se ramener à un cas plus simple en remplaçant ce voile incliné par deux voiles perpendiculaires qui sont parallèles aux directions principales du problème.



Il faut cependant déterminer les caractéristiques des voiles V_{2x} et V_{2y} à partir de celles de V2 et de l'ange d'inclinaison φ.

Pour cela on utilise les formules de changement de base pour une rotation et on obtient :

$Ix = I_{x2}\cos^2\varphi + I_{y2}\sin^2\varphi$ pour l'inertie du refends V_{2x}.

$Iy = I_{y2}\cos^2\varphi + I_{x2}\sin^2\varphi$ pour l'inertie du refends V_{2y}.

- Assemblage de voiles rectangulaires

L'inertie d'un ensemble de voiles rectangulaires est calculée à l'aide du théorème de HUYGENS

Lorsque l'ensemble des voiles rectangulaire est concourant, le centre de torsion des voiles est alors confondu avec le point de concours des voiles qui le compose.

- Voiles en U

Pour l'inertie des voiles en U, on fait simplement la différence entre l'inertie de la section intérieure et de la section extérieure. Les formules sont donc les mêmes que celles des voiles rectangulaires.

Le centre de torsion est décalé par rapport à l'axe de la membrure de la distance δ (cf. Figure 6)

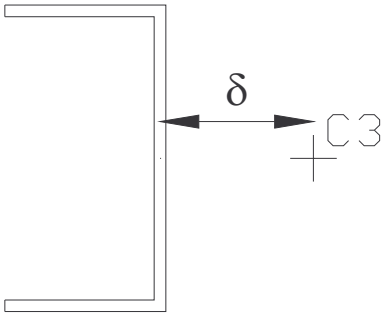


Figure 6 : Position du centre de torsion d'un voile en U

La distance δ vaut $$\delta = \frac{t\left(h_1 h_2\right)^2}{4Ix}$$

➢ *Caractéristiques de l'ensemble des voiles*

Pour déterminer les caractéristiques de l'ensemble des voiles, in est tout d'abord nécessaire de connaître la position du centre de torsion de l'ensemble de chacun des voiles.

En première approximation, on peut supposer que le centre de torsion de l'ensemble des voiles est confondu avec le centre de gravité des inerties de l'ensemble des voiles.

Pour justifier cette approximation, il faut supposer que les directions des inerties de chacun des voiles sont confondues avec les directions du repère global.

C'est l'approximation qui a été faite au paragraphe précédant dans notre cas, on a donc :

$$x_c = \frac{\sum_i I_{yi} x'_{ci}}{\sum_i I_{yi}} \quad \text{et} \quad y_c = \frac{\sum_i I_{xi} y'_{ci}}{\sum_i I_{xi}}$$

➢ *Répartition des efforts*

La répartition des efforts se fait par la méthode du centre de torsion. Cette méthode consiste en une décomposition des efforts. L'effort repris par chacun des voiles sera la superposition des effets directs du chargement et des effets indirects dus à la torsion ou à l'excentrement du chargement par rapport au centre de torsion.

- Efforts directs

Les efforts directs sont calculés pour chaque direction et pour chaque voile, au pro rata des inerties

$$H'_{xi} = \frac{\bar{H}_x I_{xi}}{\sum_i I_{xi}} \qquad \text{et} \qquad H'_{yi} = \frac{\bar{H}_y I_{yi}}{\sum_i I_{yi}}$$

Dans ce cas H'_x est l'effort repris par un voile en particulier et $\bar{H}_x$ la composante suivant le repère global X de l'effort appliqué H.

- Efforts dus à la torsion

Les efforts dus à l'excentrement des efforts appliqués par rapport au centre de torsion du groupe de voile sont déterminés en fonction de la position du voile. On calcule dans un premier temps le moment du à cette excentricité. $M = \bar{H}_x \cdot e$. Dans ce cas *e* est l'excentricité entre centre de torsion et point d'application de la charge.

On peut donc calculer la répartition des efforts dus au moment de torsion de l'ensemble des voiles.

$$H''_x = \frac{MyI_x}{J} \qquad \text{et} \qquad H''_y = \frac{MxI_y}{J}$$

Ou $J = \sum\left(I_x y^2\right) + \sum\left(I_y x^2\right)$ est l'inertie à la torsion de l'ensemble des voiles, sachant que x et y sont les distances du voile considéré au centre de torsion.

2 Présentation des calculs utilisés comme référence

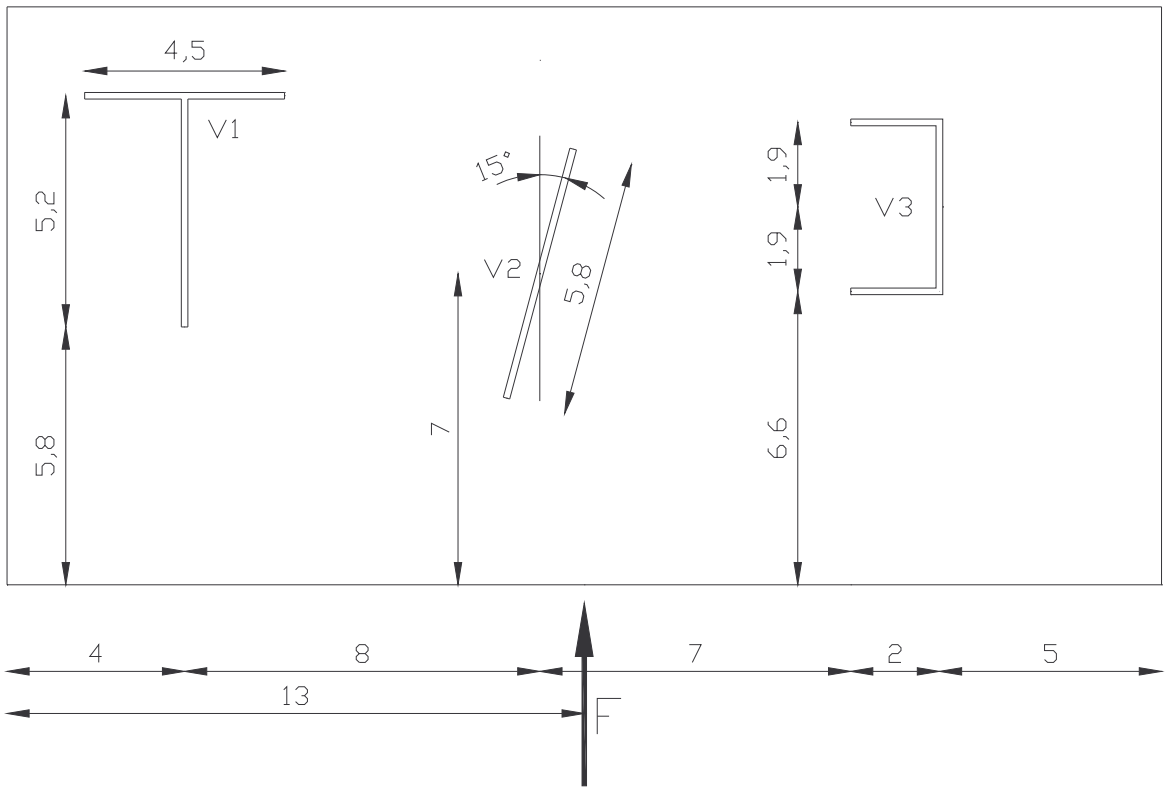
Nous allons utiliser deux modèles de référence pour comparer les résultats entre eux des trois outils de calcul.

Dans un premier temps, nous allons comparer les calculs de contreventement pur en réalisant une analyse statique. Cette analyse statique consiste en une force ponctuelle horizontale appliquée au niveau d'un plancher. On étudiera alors la répartition des efforts sur les éléments de contreventement.

Dans un second temps, nous allons réaliser une étude dynamique destinée à déterminer les efforts dynamiques appliqués à la structure.

2-1 Analyse Statique

L'analyse statique sera faite sur le cas suivant :



L'effort appliqué F simule aussi bien un effort de séisme qu'un effort de vent ramené par la façade sur le plancher considéré. On choisit F = 1 000 kN.

La dalle de béton réparti les efforts horizontaux sur les trois voiles de contreventement.

On va étudier la répartition de ces efforts ainsi que les caractéristiques mécaniques (inertie des voiles, inertie de l'ensemble des voiles) du système considéré.

➢ *Caractéristiques mécaniques des voiles*

Les caractéristiques mécaniques des voiles sont les épaisseurs, les inerties principales et la position du centre de torsion du voile.

- Voile 1 :

Rectangle	*t*	*h*	φ	*a*	*b*
1	0,15	4,15	90°	4,0	11,0
2	0,15	5,20	0°	4,0	8,40

Les caractéristiques au centre de gravité de l'ensemble du voile sont donc les suivantes :

$$Iy_1 = 0,8949\text{m}^4$$
$$Ix_1 = 4,0991\text{m}^4$$

Le centre de torsion est à l'intersection des deux voiles. On a donc : $\begin{cases} x'_{C1} = 4,00\text{ m} \\ y'_{C1} = 11,00\text{ m} \end{cases}$

- Voile 2 :

$$I_{y2} = \frac{th^3}{12} = \frac{0,15*5,8^3}{12} = 2,4389\text{m}^4$$
$$I_{x2} = \frac{5,8*0,15^3}{12} = 0,0016\text{m}^4$$

L'angle φ entre le repère principal et les directions principales d'inerties vaut $\varphi = 165°$

Le centre de torsion est au centre du voile $\begin{cases} x'_{C2} = 12,00\text{ m} \\ y'_{C2} = 7,00\text{ m} \end{cases}$

On peut aussi par soucis de simplicité, faire une hypothèse simplificatrice qui consiste à remplacer le voile incliné de l'angle φ par deux voiles perpendiculaires, parallèles aux directions principales du problème.

On trouve alors

$I_x = 0,1650\text{ m}^4$ pour l'inertie du refends V_{2x}.

$I_y = 2,2755\text{ m}^4$ pour l'inertie du refends V_{2y}.

- Voile 3 :

Rectangle	*t*	*h*	φ	*a*	*b*
1	0,15	2,00	-90°	20,0	14,40
2	0,15	3,80	0°	21,0	8,50
3	0,15	2,00	90°	20,0	6,60

L'inertie du voile est obtenue par différence entre une section pleine et la section vide au centre.

$$Ix_3 = \frac{(2,00+0,15/2)(3,8+0,15)^3}{12} - \frac{(2,00-0,15/2)(3,8-0,15)^3}{12} = 2,8562\text{m}^4$$

$$Iy_3 = 0,4934\text{m}^4$$

Le centre de torsion est décalé de la distance $\delta = \frac{0,15(2,0*3,8)^2}{4*2,8530} = 0,7592\text{ m}$

La position du centre de torsion du voile 3 est donc : $\begin{cases} x'_{C3} = 21,76\text{ m} \\ y'_{C3} = 8,50\text{ m} \end{cases}$

- *Caractéristiques mécaniques de l'ensemble des voiles*

On trouve dans le cas statique un centre de torsion au point de coordonnées

$x_c = 11,2608\text{ m}$ et $y_c = 10,0712\text{ m}$

L'inertie à la torsion de l'ensemble des voiles est maintenant calculée et on trouve

$$J = 532,57\text{ m}^6$$

- *Répartition des efforts*

On détermine, par la méthode du centre de torsion, les efforts dans chacun des voiles au moyen de la méthode du centre de torsion.

- Efforts directs

Dans le cas statique on a $\overline{H}_y = H = 1000\text{ kN}$, les résultats pour chacun des voiles sont donc les suivants :

Voile	H'_{xi} **[kN]**	H'_{yi} **[kN]**
1	39,057	456,028
2	-0,116	-234,530
3	21,534	317,399

Tableau 6 : Efforts directs dans les voiles

- Efforts dus à la torsion

Nous avons : $e = 13,00 - 11,2608$
$e = 1,7392\,\text{m}$

Le moment créé par cet excentrement vaut donc $M = 1739,2\,\text{kN.m}$. On a donc

Voile	H''_{xi} [kN]	H''_{yi} [kN]
1	-2,71	-97,20
2	0,02	0,64
3	2,53	97,81

Tableau 7 : Efforts dus à la torsion dans les voiles

Il ne reste plus qu'à faire la somme des efforts directs et des efforts dus à la torsion.

Voile	H'_{xi} [kN]	H'_{yi} [kN]
1	-36,34	358,83
2	60,41	225,96
3	-24,07	415,21

Tableau 8 : Efforts totaux dans les voiles

On voit bien que la somme des efforts appliqués est égale à la somme des efforts dans les voiles. On a bien $\sum_i H'_{xi} = 0$ et $\sum_i H'_{yi} = 1000\,\text{kN}$.

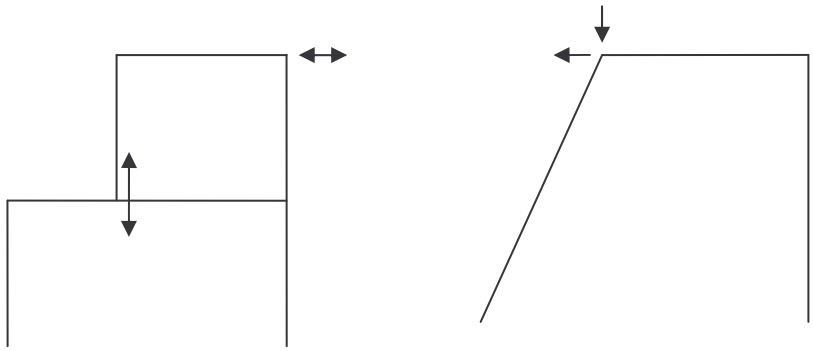
Il faut faire une remarque concernant le calcul précédent. L'hypothèse générale concernant le calcul repose sur le fait que les sections sont parfaitement encastrées les une dans les autres et forment une section ouverte monolithique.

Cette hypothèse que l'on fait n'est pas toujours réaliste. Il faudrait en effet prévoir, pour une section en béton armé, le ferraillage nécessaire pour réaliser l'encastrement des portions de voile les unes dans les autres. L'inertie des éléments qui sont utilisés dans le calcul surestime donc souvent l'inertie réelle des éléments du bâtiment tels qu'ils sont réalisés sur le chantier.

On travaillera donc souvent avec des portions de voiles qui bien qu'étant contiguës se comportent de façon indépendantes vis-à-vis de la torsion des planchers.

2-2 Analyse Dynamique

Pour permettre la comparaison entre les différents logiciels, il est nécessaire que le modèle soit traitable par les trois. Pour cela, on écartera les structures présentant un couplage entre degré de liberté horizontal et vertical. De façon plus générale, on voit sur la figure ci-dessous des exemples de structures présentant un couplage entre degré de liberté horizontal et vertical.



Cela exclu en particulier les structures pour lesquelles le contreventement ne descend pas directement aux fondations de l'ouvrage (premier cas de l'illustration).

Nous allons, pour comparer les résultats donnés lors d'une analyse dynamique, calculer le contreventement d'un bâtiment situé à Grenoble.

La structure du bâtiment est entièrement en Béton Armé. Le bâtiment est composé de quatre niveaux dont on peut voir une vue en plan sur la Figure 7 page suivante.

Les hypothèses pour le calcul de ce bâtiment sont les suivantes :

Zone sismique	I_b
Classe du bâtiment	B
Type de Site	S_2
Coefficient de comportement	q = 2

Le bâtiment que nous avons choisi de traiter est un bâtiment très simple. Il est régulier au sens des règles *PS 92*. Nous allons donc pouvoir comparer les résultats fournis par les logiciels utiliser la méthode forfaitaire fournie par le règlement PS 92.

Les hypothèses pour la modélisation de la structure sont les suivantes :

- Le bâtiment est fondé sur des fondations superficielles.
- Sur la façade ajourée, les linteaux sont encastrés dans les menots
- Les dalles sont surchargées avec une surcharge de 1000 daN/m². Le coefficient de conversion des surcharges en masses vaut $\varphi = 0,8$.

La structure comporte 4 niveaux identiques d'une hauteur de 3,63 m. Nous allons comparer dans le cadre de cette étude les résultats de l'analyse modale ainsi que les efforts dans deux voiles de contreventement de la structure.

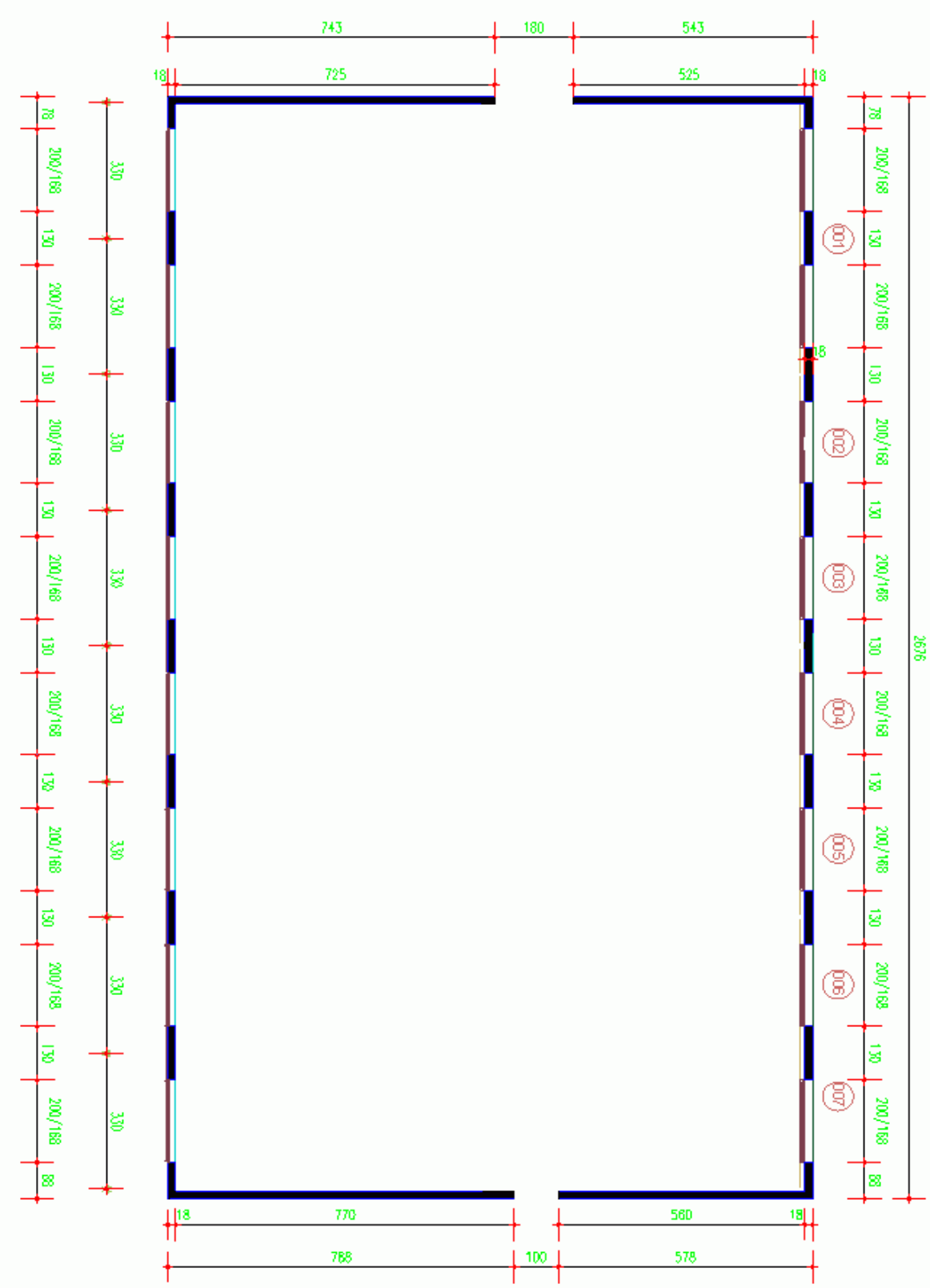


Figure 7 : Vue en plan du bâtiment

Les voiles étudiés dans le cadre de l'analyse dynamique sont les voiles 1 et 8 de la figure ci-dessous.

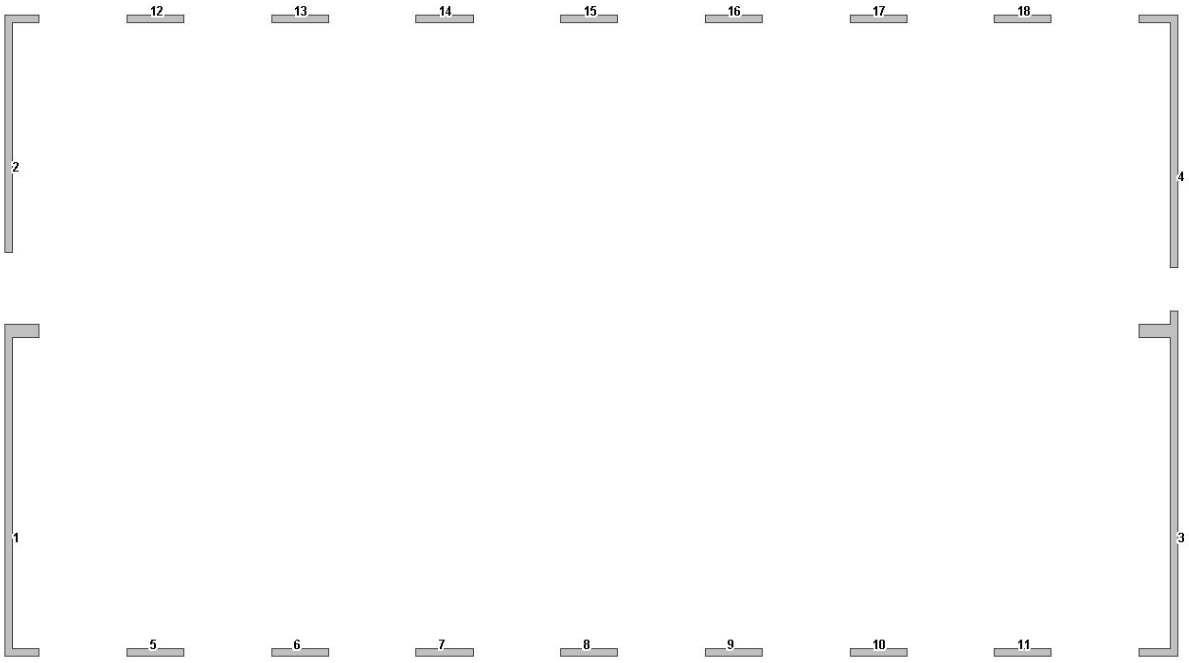


Figure 8 : Repérage des voiles de l'étude dynamique

3 Présentation des logiciels utilisés

Comme nous l'avons légèrement dévoilé lors de l'introduction du paragraphe 1, les logiciels présentés peuvent être classés suivant les méthodes de calcul qu'ils utilisent. Le premier groupe d'outils utilise la méthode des éléments fins, il comprend les logiciels *Arche Ossature* et *Effel*. Le second groupe est un singleton et n'est composé que d'*Epicentre*.

Les deux méthodes présentent chacune avantages et inconvénients. La première méthode permet des calculs d'une grande complexité, avec des éléments hétérogènes (plaques, coques, membranes, barres, câbles, …) tandis que la seconde ne permet qu'une variété de calculs beaucoup plus restreinte

3-1 Arche Ossature

Arche Ossature est un logiciel de simulation de bâtiment qui permet de mener rapidement et en toute rigueur les études de descente de charges, de contreventement et de séisme, en respectant les méthodes usuelles de la profession.

La version étudiée est la Version 12.1. C'est la version la plus récente à ce jour.

Arche Ossature se distingue par ses innovations techniques :

- ➔ *CAO 3D intégrée*
- ➔ *Pré dimensionnement*
- ➔ *Calculs de descente de charges et de contreventement avec des modèles mixant méthodes traditionnelles et modélisation Elément Fini*
- ➔ *Analyse sismique en dynamique modale.*
- ➔ *Production automatique des notes de calcul, métrés et estimatifs*
- ➔ *Connexion directe avec EFFEL*

Il est ainsi possible de réaliser avec l'outil *Arche Ossature* une analyse traditionnelle de descente de charge et en parallèle de réaliser une analyse du contreventement de la structure.

L'étude du contreventement statique (Vent) ou dynamique (Séisme) réalisée avec *Arche Ossature* est réalisée par le biais d'un modèle aux éléments finis.

Arche Ossature intègre de nombreux outils de calcul de ferraillage qui sont utilisable autant pour le calcul statique que pour le calcul de contreventement dynamique. Cela fait d'*Arche Ossature* un outil quasiment indispensable à un bureau d'étude.

3-2 EFFEL

Le module Structure d'*EFFEL* est un outil généraliste de calcul de structures permettant de construire un modèle, de le calculer et d'exploiter sous diverses formes les résultats obtenus

Le programme *EFFEL* est basé sur une modélisation du problème en « un système discret standard ». Le milieu continu est constitué de l'assemblage d'éléments finis que l'utilisateur dispose de façon à représenter le plus fidèlement possible le comportement général de la structure étudiée.

EFFEL possède plusieurs sortes d'éléments :

➔ *Des éléments ponctuels :*

Ressorts, Appuis, Butées,

➔ *Des éléments linéiques :*

Barres, Poutres, Tirants, Appuis linéaires

➔ *Des éléments surfaciques :*

Eléments de membranes (contrainte plane) : 2 degrés de liberté par nœud

Eléments de déformation plane (problèmes volumiques) : 2 degrés de liberté par nœud

Eléments de plaque mince ou épaisse avec cisaillement transversal : 3 degrés de liberté par nœud

Eléments de coque mince ou épaisse : 6 degrés de liberté par nœud

Appuis surfaciques

EFFEL est l'outil de calcul le plus complet en ce qui concerne l'étude des structures. Il permet de construire un modèle aux éléments finis avec la maîtrise de tous les paramètres de maillage, des appuis (encastrement, rotules, appuis élastiques, appuis au comportement non linéaire, …) et d'un vaste choix de méthodes de résolution du problème statique ou dynamique.

Parmi la sélection des logiciels qui a été faite, c'est celui qui est sans doute le plus complet. Il ne répond cependant pas aux même besoins que les deux autres.

La version d'*Effel* étudiée est la version 12.1 H de Janvier 2004

3-3 Epicentre

Le logiciel *Epicentre* est destiné au calcul des systèmes de contreventement de bâtiment constitués de voiles solidarisés par des linteaux.

Il propose les traitements suivants :

- ➔ *Calcul statique (chargements statiques équivalents de vent ou de séisme)*
- ➔ *Analyse modale*
- ➔ *Calcul sismique dynamique par la méthode de l'analyse modale spectrale*
- ➔ *Descente de charges des efforts de vent, statiques ou sismiques*
- ➔ *Dimensionnement du ferraillage des voiles conformément aux règles PS 92*

Le logiciel permet de décrire sans difficultés les irrégularités de la plupart des bâtiments courants : voiles de géométrie quelconque, changement de section des voiles, appuis entre voiles, poteaux, linteaux irréguliers, pieux, etc.

Les hypothèses faites pour mener le calcul à son terme sont :

- ➔ *Matériaux élastiques linéaires*
- ➔ *Théorie des voiles minces de Vlassov (torsion gauchie)*
- ➔ *Indéformabilité horizontale des planchers (diaphragmes horizontaux)*
- ➔ *Masses concentrées au niveau des planchers d'étage*
- ➔ *Modélisation tridimensionnelle des bâtiments (*

Les méthodes qui sont utilisées pour déterminer les efforts dynamiques et sismiques dans les éléments de contreventement sont la méthode des matrices transfert pour la résolution du problème statique et la méthode de Vianello-Stodola pour réaliser l'analyse modale.

Contrairement aux logiciels précédents, *Epicentre* ne fait pas du tout appel à une modélisation par des éléments finis mais à la méthode des matrices de transfert. Cela a de nombreux avantages, le principal étant le gain de temps.

Par hypothèse, les masses ne sont plus concentrées à chaque noeud qui compose un modèle élément fini mais dans les planchers. A chaque plancher sont associés trois degrés de liberté, deux de translation et un te rotation autour de l'axe vertical. On aboutit de cette façon à un modèle contenant un nombre de degrés de liberté beaucoup plus faible ce qui implique inévitablement un traitement plus rapide.

La version d'*Epicentre* est la version 11.1.P mise à jour de mars 2004.

4 Etude comparative suivant les critères fixés

4-1 Arche Ossature

a) Rapidité

➢ *Construction du modèle.*

Grâce à l'import des fonds de plans au format DXF, la saisie est relativement rapide. Celle-ci commence par une phase de préparation pendant laquelle les fonds de plans sont préparés en vue de l'import. Cette préparation s'effectue à l'aide des logiciels de DAO utilisés couramment. Cette phase de préparation permet de comprendre le comportement statique et le principe de contreventement de la structure.

Une fois cette préparation finie, on passe à la saisie des éléments de la structure. La saisie de ces éléments s'effectue principalement en vue en plan. Les éléments que l'on peut saisir sont les voiles, les poutres et linteaux, les poteaux et les dalles.

Pendant cette phase de saisie, les paramètres mécaniques telles que les dimensions, le chargement sur les dalles et les poutres ainsi que le matériau constitutif de l'élément sont également saisis.

On voit sur la Figure suivante un exemple de vue pendant la saisie de la structure.

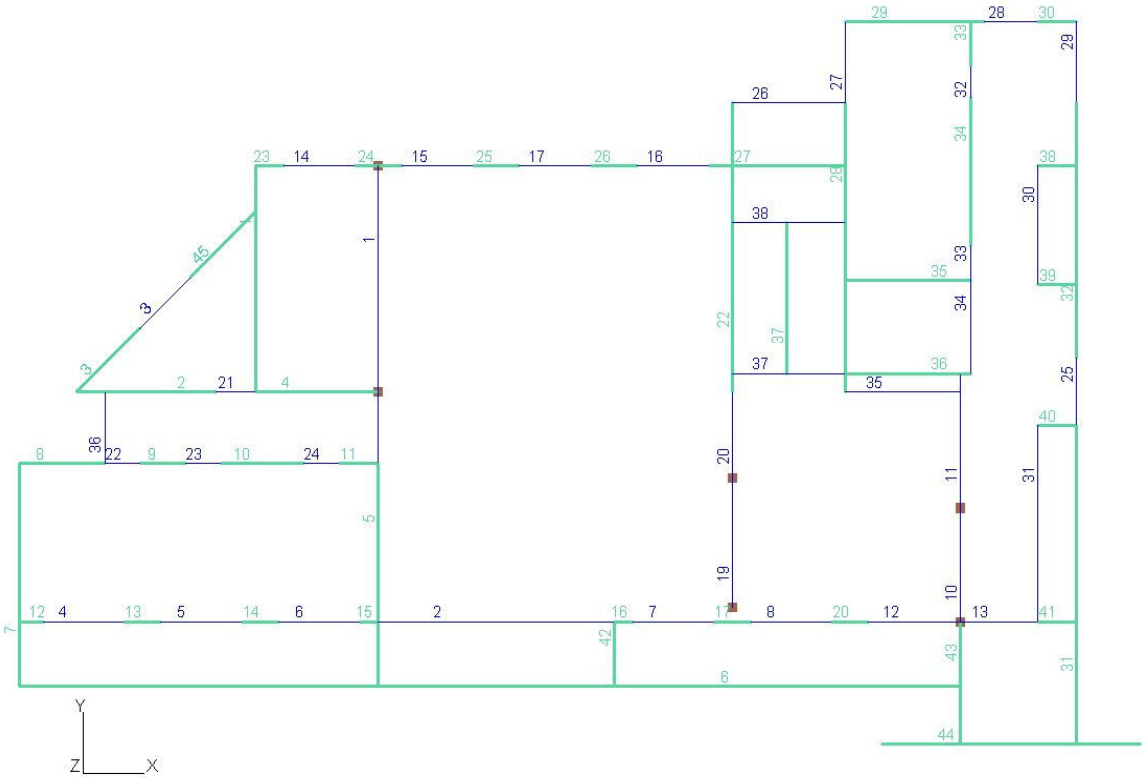


Figure 9 : Vue de la saisie sous Arche Ossature.

Cette saisie est très agréable pour des ingénieurs qui ont l'habitude de lire des plans, elle se rapproche des vues en plan traditionnelles avec les voiles et les poteaux de l'étage représentés par des éléments unidimensionnels.

Le logiciel *Arche Ossature* permet de plus la visualisation en rendu réel tridimensionnel de la structure. On voit sur la Figure 10 suivante un aperçu de ce rendu.

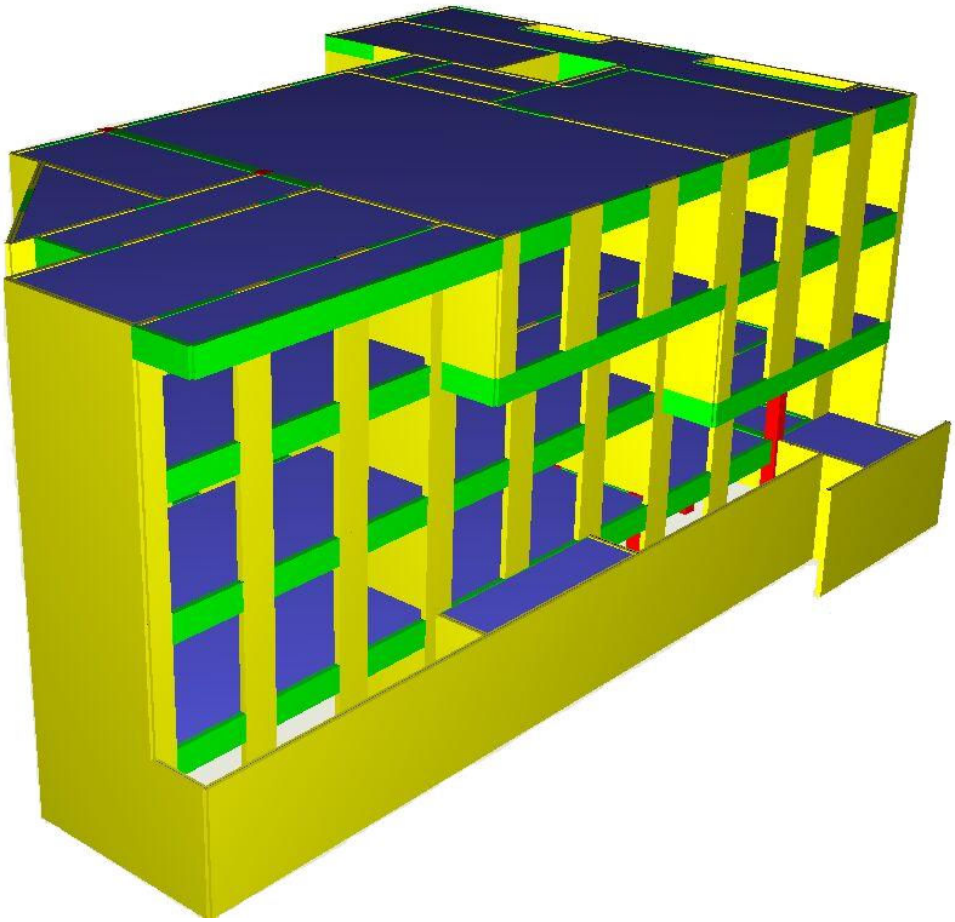


Figure 10 : Rendu 3D Réel avec Arche Ossature

La méthode de saisie, qui fait que l'on travaille sur des vues en plan pour construire un modèle tridimensionnel, est très pratique. Le bâtiment ci dessus, qui n'est pas celui traité en exemple, a été saisi, phase de préparation des fonds de plan comprise, en moins de quatre heures.

- *Calculs*

Les calculs constituent le point faible de *Arche Ossature.* Le fait que l'on ne puisse pas intervenir sur le modèle aux éléments finis, mais seulement le visualiser est un gros point faible de cet outil.

Cela est souvent la cause d'erreurs de l'application qui mettent en défaut le programme et empêchent la poursuite du calcul.

Bien qu'il soit possible de spécifier les paramètres de maillage de chacun des éléments indépendamment des autres, lorsqu'une erreur de maillage est détectée, l'élément incriminé n'est pas donné. Cela rend souvent très long la recherche des erreurs car il faut envisager plusieurs cas possibles, relancer le maillage, revenir en arrière lorsque l'on ne trouve pas l'élément qui rende impossible le maillage.

- *Rédaction de la note de calcul et synthèse des résultats*

La rédaction de la note de calcul est relativement simple. On a accès directement aux éléments de la note de calcul qu'il est possible d'éditer séparément les uns des autres.

On regroupera donc la synthèse de l'analyse dynamique qui donne les caractéristiques de chacun des modes (fréquence, période, pulsation, amortissement) et pour chaque direction de calcul la masse modale et le pourcentage de masse excitée.

On accède aussi très rapidement aux efforts dans les éléments par le biais de notes synthétiques qui appellent les efforts dans le ou les éléments sélectionnés.

Pour les voiles, on aura de cette façon le torseur en tête du voile. Ce torseur va comprendre les cas de charges permanentes, les surcharges ainsi que les efforts sismiques pour chacune des directions de séisme demandées.

On voit dans le Tableau 9 un extrait de fiche rappelant les efforts.

1	**Identification**	
	Poteau 15	Etage n°1 - pieux + long
	Section : D=0.80 m Hauteur : 1.00 m - Longueur flambement : 1.00 m	
	Matériaux : BETON	
2	**Sollicitations internes - Eléments finis (T, T.m)**	

Cas	Nx	Ty	Tz	My	Mz
Résultats en tête du poteau					
G	38.8	0.6	-5.2	-5.2	0.6
Q	3.0	0.5	-0.1	-0.1	0.5
S X	-14.2	6.8	0.4	0.4	6.8
S Y	13.6	-5.4	1.0	1.0	-5.4
S Z	8.9	3.6	0.6	0.6	3.6

Tableau 9 : Extrait de fiche d'efforts sur un poteau

On voit que ces fiches peuvent être directement exploitées dans un logiciel de calcul de ferraillage par exemple ou servir au dimensionnement des éléments qui vont servir de support à cet élément.

Les mêmes fiches sont disponibles pour les poutres, les voiles, les fondations.

Pour ce qui est de la rédaction des notes de calcul, celle-ci peut donc se faire très rapidement en regroupant les notes des voiles, des poteaux, des poutres et éventuellement des fondations.

On a compté environ trois heures pour regrouper, et assembler dans un même document l'ensemble des notes de calcul, des plans de repérage, et les notes justificatives accompagnant la note d'efforts.

On peut donc faire la synthèse des temps passés pour notre exemple.

Etape de l'étude	Temps [h]
Saisie	12
Calculs	1
Rédaction de la note de calcul	3
Total	**16**

Tableau 10 : Récapitulatif de la rapidité du logiciel

b) *Précision*

- *Analyse statique*

Le logiciel *Arche Ossature* ne permet pas l'ajout de forces ponctuelles horizontales. On ne peut donc pas effectuer l'analyse statique.

- *Analyse dynamique*

  - Précisions concernant la modélisation

On apporte quelques précisions tout d'abord sur la modélisation

Nous modélisons les dalles, qui dans le cas de ce bâtiment sont des dalles alvéolaires de la façon suivante :

- L'épaisseur de la dalle saisie vaut 25 cm, identique à celle de la dalle alvéolaire, la raideur de la dalle sera donc comparable à celle de la dalle alvéolaire.
- La masse de la dalle alvéolaire, qui dans ce cas est de 450 daN/m², est intégrée dans le modèle sous la forme d'une charge répartie sur l'ensemble de la dalle.

Les hypothèses de calcul sont identiques à celles définies au paragraphe 2-2.

- Résultats de l'analyse modale

Les résultats complets de l'analyse modale sont disponibles en Annexe 2 et on ne rappelle ici que les résultats de l'analyse concernant les modes propres qui ont une action prépondérante vis-à-vis du comportement dynamique de la structure.

Mode	Direction	Période [s]	Fréquence [Hz]	Masse modale relative [%]
1	X	0,226	4,43	86,72
2	Y	0,166	6,02	77,49
16	Torsion	0,099	10,12	0,47

Tableau 11 : Synthèse de l'analyse modale sous Arche Ossature

Compte tenu de la complexité des analyses modales, on ne dispose pas de calculs de référence. On comparera donc en fin d'étude les résultats obtenus par chacun des outils.

- Répartition des efforts sismiques

On peut consulter dans l'annexe destinée aux résultats du modèle *Arche Ossature* l'ensemble des efforts pour les voiles.

On peut, à titre de comparaison, rappeler les efforts du voile 1

Cas	Nx	Ty	Mz
G	29,8	0,0	6,0
Q	5,1	0,0	3,1
S X	-29,0	-11,9	19,8
S Y	57,3	-68,4	78,2
S Z	14,4	0,7	-0,9
S	65,8	69,4	80,7

Tableau 12 : Efforts dans le Voile 1

On peut, pour comparer les résultats dans les voiles fortement ouverts qui composent la façade, rappeler les efforts dans le voile 8.

Cas	Nx	Ty	Mz
G	34,0	0,0	0,0
Q	47,5	0,0	0,0
S X	-0.9	21.7	21.9
S Y	0.3	-0.6	-0.7
S Z	14.2	-0.2	-0.2
S	14.2	21.8	21.9

Tableau 13 : Efforts dans le Voile 8

Il reste à comparer ces résultats avec ceux obtenus avec les autres logiciels de calcul.

c) Post Traitement

Le post traitement est l'étape qui permet à l'ingénieur d'obtenir une note de calcul en vue de l'élaboration du plan de ferraillage.

Cette étape est relativement rapide avec *Arche Ossatures*, les nombreux modules de ferraillages qui sont disponibles avec le module de descente de charge rendent ce post traitement aisé.

L'ensemble des efforts (statiques et dynamiques) est automatiquement exporté vers ces modules de ferraillage. On obtient ainsi, en utilisant des outils qui sont relativement fiables, une note de calcul ainsi qu'un croquis de ferraillage.

C'est seulement dans la phase suivante, qui est commune quel que soit le type de logiciel, que le projeteur qui est en charge du dessin des plans de ferraillage travaille avec la note de calcul et dessine le plan de ferraillage.

On estimera donc le temps nécessaire pour parvenir à une note de calcul convenable à 15 minutes par voile une fois les efforts déterminés.

d) Coût

Arche Ossature est le logiciel le plus cher de la sélection. Il est cependant beaucoup plus abouti que les autres et permet le traitement des structures en zone sismique ainsi que la construction traditionnelle.

Le coût élevé de *Arche Ossature* s'explique par les modules complémentaires de ferraillage qui permettent de réaliser très rapidement des plans de relative bonne qualité.

La formation complémentaire à prévoir pour ce logiciel est sensiblement la même que pour *Effel*. Il s'agit de deux jours de formation nécessaire à une bonne prise en main des outils. La journée de formation est facturée 840 €.

La licence inclus les éléments suivants :

Modélisation 3D du bâtiment
Descente de charge Réglementaire
Descente de charge aux éléments finis
Calcul dynamique modal et sismique
Ferraillage des Voiles, Poutres et Poteaux

Les coûts pour le logiciel *Arche Ossature* sont les suivants :

	Prix HT (€)	Prix TTC (€)
1 Licence	8 800	10 525
Mise à jour annuelle	1 320	1 580
Support technique	Inclus dans les mises à jour	
Formation	1 680	2000
Total	**11 880**	**14 210**

Tableau 14 : Coûts du logiciel Arche Ossature

e) *Polyvalence de l'outil*

Arche Ossature est un outil relativement polyvalent. Il permet de faire comme c'est le cas ici du calcul de contreventement en zone sismique mais aussi des calculs de descente de charge traditionnels.

En ce qui concerne la partie statique, il est possible de traiter des structures de tout type à l'aide de *Arche Ossature.* On peut aussi bien traiter des structures traditionnelles avec des voiles porteurs, que des structures avec un réseau de poteaux et de poutres porteuses et portées ou encore des structures mixtes comportant des poutres, des poteaux et des voiles porteurs.

Pour la partie dynamique, comme pour l'étude statique, il est possible de traiter les structures contreventées par des voiles ainsi que les structures contreventées par des portiques. On préfèrera cependant dans le cas des structures contreventées uniquement par des portiques l'utilisation d'outils plus spécialement dédiés aux structures à barre tels que *ROBOT millenium.*

Il n'est cependant pas possible de traiter avec *Arche Ossature* des structures métalliques. Les profilés métalliques ne faisant pas partie des profils possibles pour les poutres et les poteaux. Cela n'a une influence que pour l'étude dynamique.

En effet, pour une étude statique, il est possible de remplacer les profilés métalliques par des profilés en béton de masse équivalente mais qui seront de raideur différente. Si on veut décrire en même temps la juste masse et la juste raideur des éléments, il est nécessaire de procéder différemment.

Au lieu de modéliser un élément qui aurait la même masse mais de raideur différente, on recherche un élément qui a la même raideur. Comme seuls des éléments de section circulaire ou rectangulaire sont disponibles dans *Arche Ossature*, la modélisation en raideur équivalente ne sera juste que pour deux paramètres de raideur. On pourra par exemple déterminer Ix et S dans le cas de la flexion composée, Ix et Iy dans le cas de la flexion déviée.

On voit qu'il est tout de même possible de traiter le cas des structures partiellement métalliques. Cependant le temps nécessaire pour déterminer les caractéristiques équivalentes de chacun des éléments fait que l'utilisation de *Arche Ossature* pour des structures métalliques n'est pas judicieuse.

On rappellera donc ici les différentes caractéristiques concernant la polyvalence du logiciel *Arche Ossature* :

Critère	**Résultat**
Type de Contreventement	Mixte Voile / Portique = 2
Matériaux possibles	Béton = 1
Directions de calcul de l'analyse modale	Horizontale et verticale = 3
Total	**6**

Tableau 15 : Synthèse de la polyvalence d'Arche Ossature

Le logiciel *Arche Ossature* obtient donc une note de **polyvalence de 6**

Cependant, on a ici un logiciel qui permet de faire aussi des analyses statiques très poussées. La polyvalence de cet outil dépasse alors le cadre de ce rapport.

f) Synthèse des résultats et commentaires :

Critère	Valeur
Rapidité	17
Précision	Moyenne
Post traitement	Bon
Coût	11 880
Polyvalence	6

Tableau 16 : Synthèse des résultats de Arche Ossature

On pourra rappeler les principaux avantages de *Arche Ossature.*

Les avantages majeurs sont les suivants :

- Modélisation et saisie intuitive
- Analyse statique et dynamique possible
- Modules de ferraillages puissants
- Bonne polyvalence

Les inconvénients sont les suivants :

- Calculs très lourds
- Modèle éléments fini peu paramétrable
- Calculs peu précis
- Cher

4-2 EFFEL

a) Rapidité

- *Construction du modèle*

De par l'utilisation conjointe d'E*ffel* avec celle d'*Arche Ossature*, le temps nécessaire à la saisie du modèle est très faible.

Une fois que la structure est importée depuis *Arche Ossature* vers *Effel*, il n'y a que très peu de modifications à faire. Lorsque c'est nécessaire, on peu travailler sur les paramètres de maillage des différentes coques qui modélisent les voiles et les dalles du modèle.

Il est de plus nécessaire, pour éviter le comportement en portique des Poteaux contenus dans la structure, d'appliquer les bonnes conditions d'encastrement ou d'articulation aux barres de la structure. En effet, par défaut, *Arche Ossature* encastre les poteaux à chacune de ses extrémités. Les outils de gestion de label et d'entités sous *Effel* permettent d'appliquer assez rapidement les relâchements nécessaires.

- *Calculs*

Les cas de charge sont automatiquement importés depuis *Arche Ossature* vers *EFFEL*, il n'y a donc pas de travail complémentaire avant de lancer les calculs.

Les calculs sont aussi rapides, ou lent selon le point de vue, qu'avec *Arche Ossature*. Cela provient du fait que les outils qui sont utilisés par *Arche Ossature* sont des modules issus d'*EFFEL.* Il est donc normal d'avoir des temps de calcul comparables, une heure dans notre cas.

- *Rédaction de la note de calcul et synthèse des résultats*

Lorsque l'on a correctement travaillé avant de réaliser l'import de la structure depuis *Arche Ossature* vers *EFFEL*, la rédaction de la note de calcul est la phase la plus longue.

Contrairement au logiciel Arche, qui permettait d'avoir une fiche par élément de la structure, *Effel* ne le permet pas lorsque l'on veut obtenir des résultats sous la forme d'un torseur réduit au pied ou en tête de chaque voile. Il est cependant possible d'avoir les efforts pour les éléments de type « barre » tels que les poutres et les poteaux.

Les notes de calcul d'effort sont par contre directement exploitables à l'aide d'un tableur. Elles sont converties automatiquement vers *Excel*. Cela facilite le post-traitement en permettant par exemple la somme d'efforts par cas de charge ou l'export vers les logiciels de post traitement.

Un des gros points noirs d'*Effel* concerne le rassemblement des résultats. Là où la synthèse était très simple avec Arche, elle l'est beaucoup moins avec *Effel*.

Pour déterminer la résultante des efforts sous un élément de contreventement, il est nécessaire de passer pour chaque voile un temps très long.

Le calcul du torseur des efforts réduits en pieds de chaque voile se fait par intégration des contraintes le long d'une coupe. Il faut donc pour chaque voile de contreventement, définir la coupe en pied de voile, puis demander les contraintes le long de cette coupe pour enfin avoir la résultante des contraintes sous forme d'un torseur d'efforts réduits.

Pour corser le tout, il est nécessaire de répéter les deux dernières opérations deux fois, une première fois pour déterminer la résultante des efforts verticaux et le moment M au pied du voile, une seconde fois pour la résultante des efforts horizontaux.

On se rend alors très bien compte que pour un bâtiment qui comporte un grand nombre de voiles, la rédaction d'une note de calcul est un exercice qui peut se révéler très vite particulièrement rébarbatif du fait de la grande répétition de la même tache.

On regroupe donc les résultats de l'analyse concernant la rapidité dans le tableau ci-dessous

Etape de l'étude	Temps [h]
Saisie	2
Calculs	1
Rédaction de la note de calcul	15
Total	**18**

Tableau 17 : Récapitulatif de la rapidité du logiciel

b) *Précision*

- *Analyse statique*

On mène l'étude statique décrite au paragraphe 2-1 du Chapitre 3 -

On aboutit alors aux résultats suivants :

- Caractéristiques des voiles

Les caractéristiques des voiles ne sont pas accessibles. On passera donc directement à la comparaison des résultats du calcul.

- Répartition des efforts

Nous avons, comme pour tous les logiciels aux éléments finis plusieurs modélisations possibles.

Dans un premier temps, nous modéliserons les voiles par des éléments de type poutre encastrés à leur base et dans le plancher supérieur.

Pour éviter les répartitions de contrainte due à l'élasticité de la plaque reliant les voiles, il est nécessaire de lui affecter un matériau de très grande rigidité. Cela est fait avec un matériau tel que de l'acier qui est beaucoup plus raide que le béton des voiles.

Pour ne pas perturber le calcul, on décide de plus de négliger le poids propre des éléments.

Modèle n°1 – Poutres équivalentes

On repère les éléments sur la vue suivante :

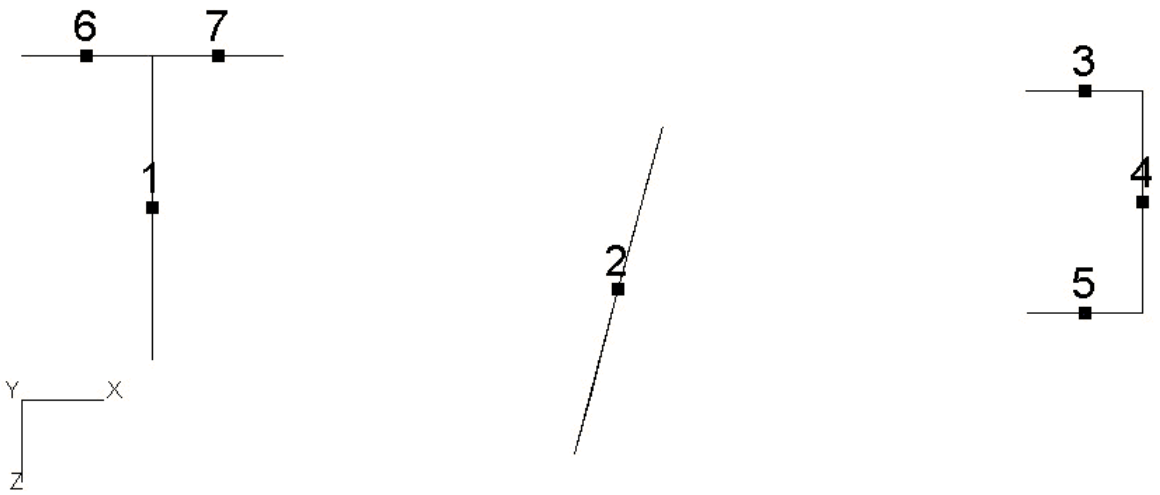


Figure 11 : Repérage des éléments du modèle.

On regarde alors les réactions d'appui de la structure.

Elément	FX (T)	FY (T)	FZ (T)
1	-0.01	9.82	-29.23
2	9.98	0.49	-37.41
3	-2.01	-11.44	-0.03
4	0	2.58	-33.25
5	-0.98	8.75	-0.03
6	-3.49	-7.78	-0.02
7	-3.48	-2.41	-0.02

Pour pouvoir comparer avec le calcul théorique, il est nécessaire de transformer un peu ces résultats bruts. Après transformation, on obtient les résultats suivants :

Voile	H'_{xi} **[kN]**		H'_{yi} **[kN]**	
	Théorie	*Effel*	Théorie	*Effel*
1	-36,34	-69,7	358,83	292,7
2	60,41	99,8	225,96	374,1
3	-24,07	-29,9	415,21	333,1

On voit qu'avec cette modélisation en poutres équivalentes, les résultats sont éloignés du calcul théorique. Pour essayer de corriger cette imperfection, nous allons procéder à une seconde modélisation en remplaçant les éléments de poutres utilisés pour modéliser les voiles par des éléments finis de type coque.

En effet, il se peut que compte tenu du faible élancement des voiles, les éléments poutre ne soient pas appropriés à notre modèle.

Modèle n°2 – Maillage en coques

On repère les éléments sur la vue suivante :

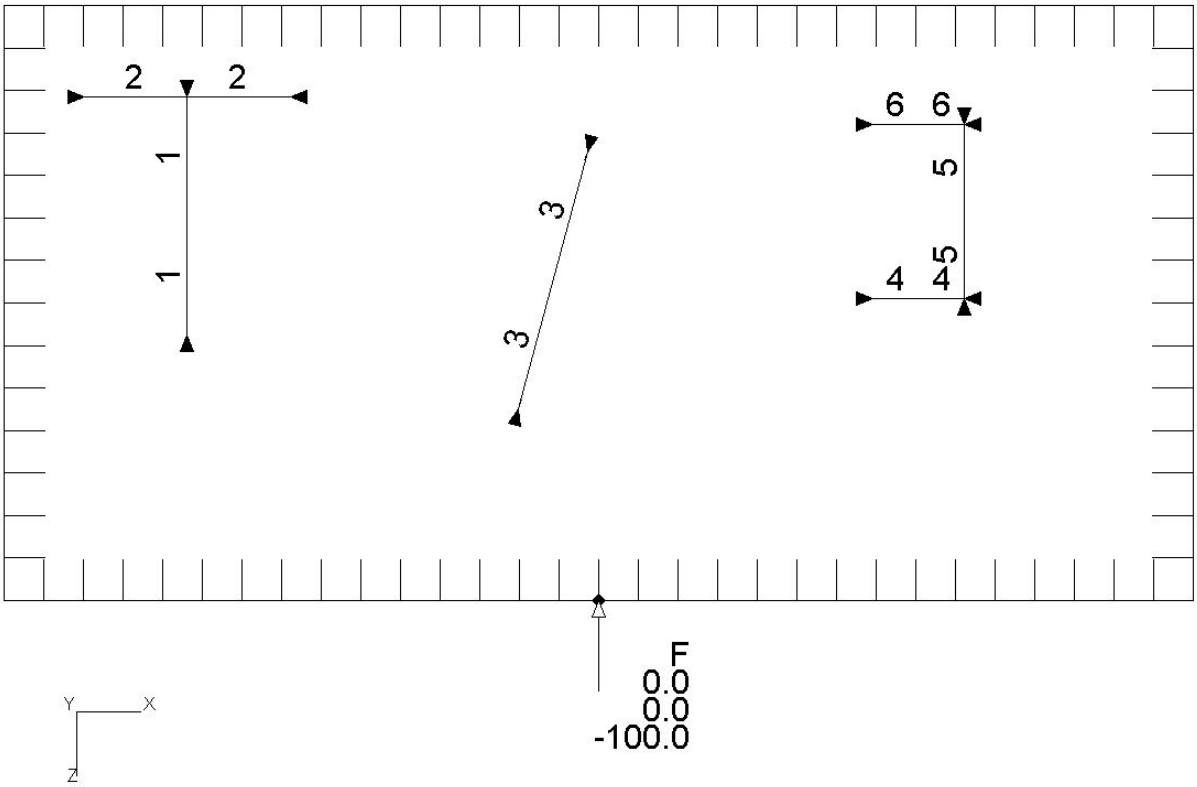


Figure 12 : Repérage des éléments du cas statique 2

Les résultats obtenus pour ce modèle sont les suivants :

Voile	H'_{xi} [kN]		H'_{yi} [kN]	
	Théorie	*Effel*	Théorie	*Effel*
1	-36,34	-74,4	358,83	311,7
2	60,41	103,0	225,96	384,4
3	-24,07	-28,5	415,21	331,7

Malheureusement, la répartition des efforts n'est pas meilleure que dans le cas précédent. On peut dès lors se poser des questions sur la validité d'un calcul lorsque des éléments surfaciques sont utilisés.

Une première hypothèse consiste à se demander si le calcul théorique que l'on a fait correspond bien à ce que l'on a essayé de modéliser. Pour cela, on change les hypothèses du calcul théorique.

Dans cette ébauche d'explication, on effectue le calcul en dissociant chacune des sections des voiles. Les voiles deviennent alors tous rectangulaires et indépendants les uns des autres.

On met alors en parallèle les résultats du nouveau calcul théorique. Le repérage est celui visible sur la Figure 12.

Voile	H'_{xi} **[kN]**		H'_{yi} **[kN]**	
	Théorie	*Effel*	Théorie	*Effel*
1	0,00	0,0	229,3	311,7
2	-118,2	-74,4	0,0	0,0
3	137,4	103,2	513,1	385,1
4	-6,9	-19,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	257,5	331,7
6	-12,4	-47,8	0,0	0,0

La répartition des efforts est cette fois ci légèrement plus proche de la répartition calculée avec la méthode du centre de torsion. On voit que les deux calculs théoriques encadrent le modèle *Effel*. Le comportement des voiles modélisés avec des coques est donc intermédiaire entre des sections ouvertes travaillant en flexion gauchie et des sections isolées.

L'encastrement des portions de voiles les unes dans les autres permet un comportement en pseudo sections ouvertes mais pas aussi efficacement qu'avec la méthode du centre de torsion.

- *Analyse dynamique*

Comme pour l'étude du logiciel *Arche Ossature*, on soumet la structure de test à l'analyse modale.

Le modèle utilisé pour le calcul sous *Effel*, est le même que celui traité avec Arche. Les remarques concernant le modèle sont donc les mêmes que celle faites au paragraphe concernant *Arche Ossature*.

- Résultats de l'analyse modale

Les résultats complets de l'analyse modale sont disponibles en Annexe 2. On ne rappelle ici que les résultats de l'analyse concernant les modes propres qui ont une action prépondérante vis-à-vis du comportement dynamique de la structure.

Mode	Direction	Période [s]	Fréquence [Hz]	Masse modale relative [%]
1	X	0,232	4,31	86,59
2	Y	0,167	5,89	77,82
18	Torsion	0,115	8,71	1,25

Tableau 18 : Synthèse de l'analyse modale sous Effel

On remarque tout de suite que les résultats sont très proches entre les deux modélisations. Bien que les fréquences soient légèrement différentes, les masses modales relatives sont identiques. On peut donc s'attendre à des modes qui aient des déformées semblables.

Les déformées des modes sélectionnés dans le tableau ci-dessus sont visibles ci-dessous.

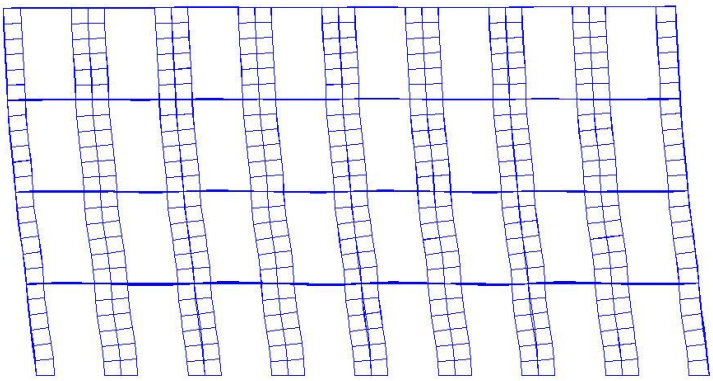


Figure 13 Déformée du mode 1

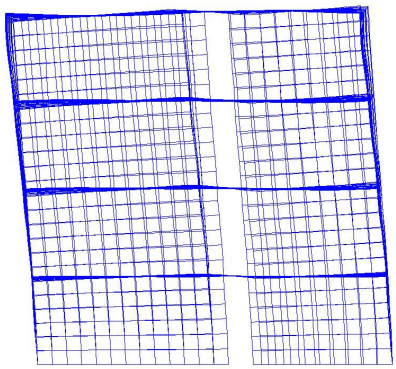


Figure 14 Déformée du mode 2

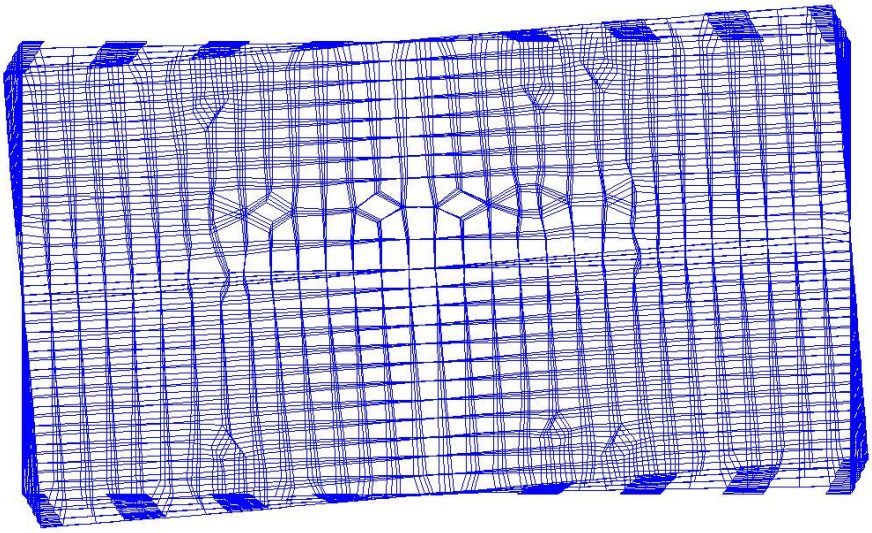


Figure 15 : Déformée du mode de torsion

- Répartition des efforts sismiques

On peut, à titre de comparaison avec le calcul fait avec *Arche Ossature*, rappeler les efforts du voile 1, ces efforts sont en tonnes et en tonne mètre.

Cas	Nx	Ty	Mz
G	100,20	0,0	4,1
Q	87,8	0,0	9,1
S X	75,6	9,2	90,2
S Y	72,4	127,1	384,4
S Z	21,6	1,8	1,2

Tableau 19 : Efforts dans le Voile 1

On voit tout d'abord que les efforts donnés par les charges permanentes sont très différents de ceux calculés avec Arche. Cela s'explique très simplement par le seul fait que l'hypothèse d'un plancher ne portant que dans un sens n'est pas du tout respectée par le modèle aux éléments finis. Heureusement, lorsque l'on fait un calcul avec *Arche ossature,* le sens de portée des dalles est bien respecté. Par contre, les efforts calculés sont très différents, surtout en ce qui concerne le moment en pieds des voiles.

Cela laisse présager, alors que le modèle est très simple, que les résultats pour un bâtiment beaucoup plus complexe soient encore plus différents.

On peu aussi comparer les efforts dans un des trumeaux de la façade.

Cas	Nx	Ty	Mz
G	37,6	0,0	0,2
Q	40,7	0,0	0,3
S X	-0,6	38,1	32,3
S Y	14,6	-0,5	-0,1
S Z	1,1	-1,0	-0,2

Tableau 20 : Efforts dans le Voile 8

Dans le cadre de ce trumeau, les résultats sont par contre beaucoup plus proches. Cela s'explique sûrement par la petite taille de l'élément de contreventement et par le fait, qu'étant plus nombreux, l'erreur de calcul se répartit entre chacun des éléments.

En ce qui concerne la précision des calculs, on pourra conclure en disant que finalement celle-ci dépend majoritairement des paramètres de maillages que l'on a employés.

Il faudra donc s'assurer, par des vérifications simples que le modèle que l'on a construit a le bon comportement. Cette vérification peut passer par un contrôle de la structure déformée sous le chargement qu'on lui impose.

c) Post Traitement

Le post traitement est équivalent sous *Arche Ossature* et sous *Effel*. Une fois les efforts statiques et dynamiques connus, la note de calcul de ferraillage est réalisée à l'aide des modules de ferraillages qui sont aussi bien compatibles avec *Arche Ossature* qu'avec *Effel*.

d) Coût

Le prix de la licence intègre les éléments suivants :

Module de base Eléments Finis 3D, Analyse sismique / Dynamique / Non Linéaire, Expert Béton et Expert Métal.

Le module de base 3D permet la saisie, le calcul et l'exploitation du modèle aux éléments finis.

Compte tenu de la complexité de cet outil cependant très puissant, il est nécessaire de prévoir deux journées de formations nécessaires à une bonne connaissance des outils de calcul. Ces journées de formation sont facturées par l'éditeur du logiciel le même prix pour *Arche Ossature* et *Effel*.

Effel est donc un outil relativement cher.

	Prix HT (€)	Prix TTC (€)
1 Licence	7 300	8 730
Mise à jour	1 095	1 310
Support technique	Inclus dans les mises à jour	
Formation	1 680	2 000
Total	**10 075**	**12 050**

Tableau 21 : Coûts du logiciel Effel

e) *Polyvalence de l'outil*

La polyvalence d'*Effel* est sans doute son point fort. On peut modéliser avec ce logiciel tous les types de structures.

Les structures avec un contreventement mixte Voiles / Portiques, les structures comportant des éléments de contreventement ou de structure porteuse en métal, ainsi que les structures présentant des couplages entre degrés de liberté horizontaux et verticaux peuvent être modélisées.

Critère	**Résultat**
Type de Contreventement	Mixte Voile / Portique = 2
Matériaux possibles	Béton, bois et métal = 2
Directions de calcul de l'analyse modale	Horizontale et verticale = 3
Total	**7**

Tableau 22 : Polyvalence d'Effel

On attribuera la note maximale de polyvalence à *Effel* soit 7 points. Comme pour le logiciel *Arche Ossature*, le domaine d'utilisation d'*Effel* sort du cadre de ce rapport car on peut l'utiliser pour des analyses de structures en dehors des zones sismiques.

f) Synthèse des résultats et commentaires

On regroupe l'ensemble des résultats dans le tableau suivant :

Critère	Valeur
Rapidité	18
Précision	Bonne
Post traitement	Bon
Coût	10 075
Polyvalence	7

Tableau 23 : Synthèse des résultats pour Effel

On pourra rappeler les principaux avantages de *Effel.*

Les avantages majeurs sont les suivants :

- Import direct depuis *Arche Ossature* de la structure
- Analyse statique, dynamique, non linéaire possible
- Modules de ferraillages puissants
- Bonne polyvalence

Les inconvénients sont les suivants :

- Logiciel très complexe
- Calculs lourds
- Modélisation aux éléments finis qui peut ne pas être correcte
- Cher

4-3 Epicentre

a) Rapidité

➢ *Construction du modèle*

Contrairement à ce qui est proposé avec les outils précédents, il n'ay a aucune possibilité d'import avec *Epicentre*. Il est donc nécessaire de redéfinir entièrement l'ensemble de la structure.

Les moyens informatiques mis en œuvre pour le dessin des plans sont encore une fois une précieuse aide pour la saisie de la structure.

La saisie des éléments de la structure sous *Epicentre* se faisant à partir des coordonnées des éléments, il est possible d'accéder à ces mêmes coordonnées à l'aide des différents logiciels de DAO.

La saisie des différents éléments qui compose la structure est donc relativement rapide.

On peut voir sur la figure suivante la saisie d'un voile

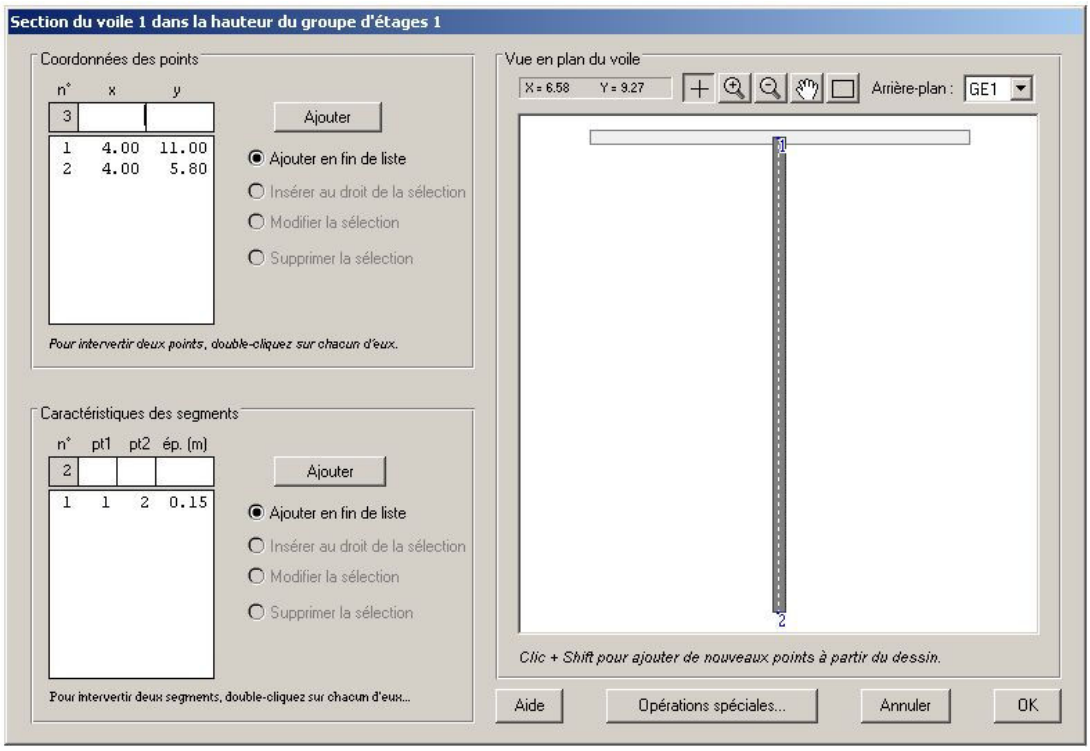


Figure 16 : Saisie d'un voile sous Epicentre

La saisie de l'ensemble de la structure nécessaire au traitement du calcul de référence dynamique a été faite en une heure.

Un des avantages principaux d'épicentre réside dans le fait qu'il est nécessaire de ne décrire dans chaque niveau ou chaque groupe de niveaux que les voiles dont la géométrie change. Ainsi, lorsqu'un voile est identique sur l'ensemble de la structure la saisie nécessaire à sa description n'est faite qu'une seule fois. Il est juste précisé si le voile est décrit, répété ou supprimé sur les groupes d'étages supérieurs. On peu voir sur la figure ci-dessous la description de l'ensemble des voiles.

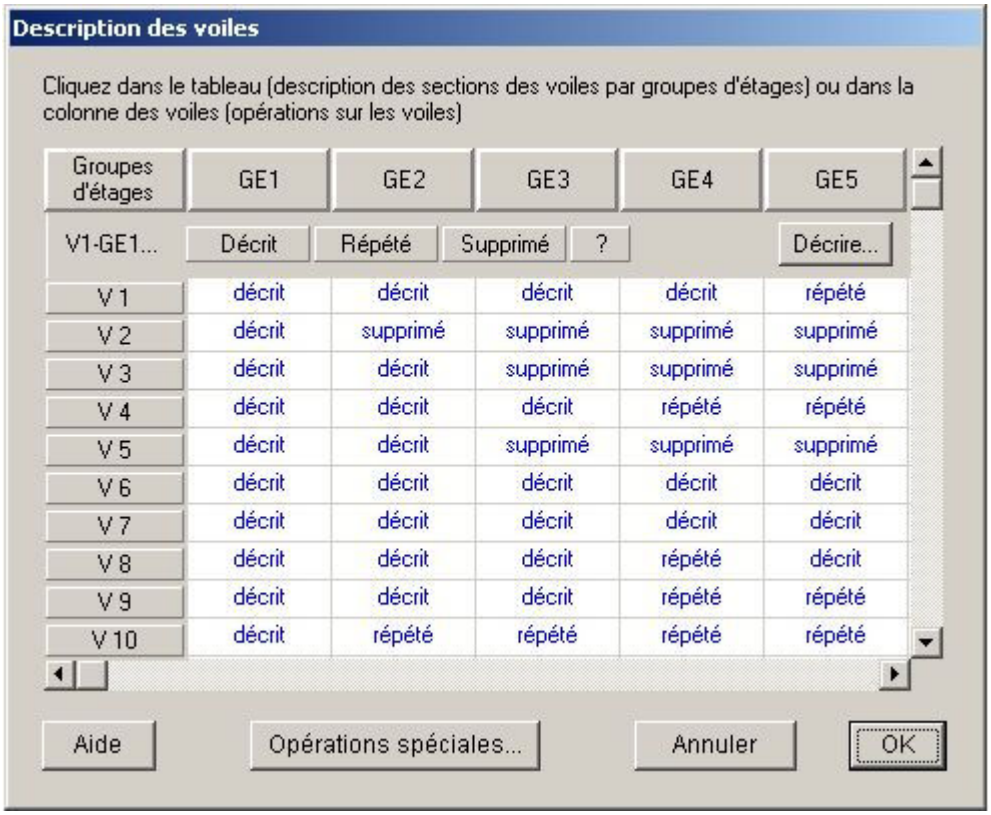


Figure 17 : Description des voiles dans les Groupes d'étage

On peut donc voir que certains voiles ne sont présents que dans le niveau le plus bas et disparaissent ensuite, que certains autres sont décris sur un niveau bas, répétés ensuite puis re-décris et enfin supprimés.

Il est possible de suivre la construction du modèle à l'aide d'écrans permettant la vue en plan.

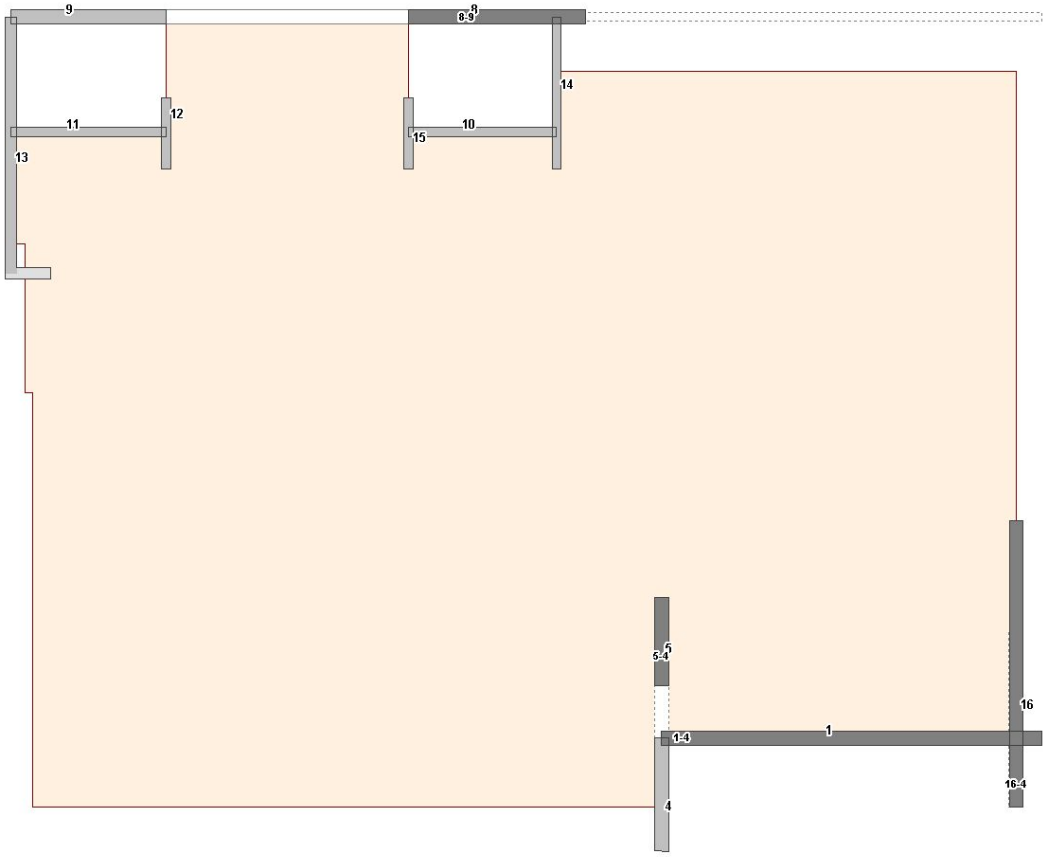


Figure 18 : Vue en plan du modèle sous Epicentre

La vue en plan permet de contrôler la position et la géométrie des éléments les uns par rapport aux autres.

- *Calculs*

Pour l'ensemble des calculs, *Epicentre* est de loin le logiciel le plus rapide. La modélisation choisie en supposant les planchers indéformables et en ne leur affectant que trois degrés de liberté permet des temps de calculs très cours. Le temps de calcul, même pour le projet le plus complexe que j'ai traité qui est exposé au Chapitre 5 -, n'a jamais dépassé la dizaine de secondes. Ces temps de calculs ne sont pas du tout comparables avec les temps de calcul des autres outils.

- *Rédaction de la note de calcul et synthèse des résultats*

Le logiciel *Epicentre* fournis une note de calcul qui est déjà mise en page. On peut très facilement copier depuis *Epicentre* vers un logiciel de traitement de texte les éléments de cette note de calcul. La composition de la note se fait alors selon les éléments que l'on veut mettre.

On ne retiendra par exemple que les hypothèses de calcul, les résultats de l'analyse modale et les réactions d'appui par exemple.

On peut ainsi faire la mise en page qui convient et adapter la présentation des résultats, inclure des commentaires, de façon plus simple qu'en composant la note de calcul à partir de tableaux.

Le Tableau 24 ci-dessous récapitule le temps nécessaire à chacune des étapes du calcul.

Etape de l'étude	**Temps [h]**
Saisie	2
Calculs	0
Rédaction de la note de calcul	2
Total	**4**

Tableau 24 : Récapitulatif de la rapidité du logiciel

b) Précision

➢ *Analyse statique*

On mène l'étude statique décrite au paragraphe 2-1 du Chapitre 3 -

On aboutit alors aux résultats suivants :

- Caractéristiques des voiles

Extrait de la note de calcul fournie par Epicentre

```
-----------------------------------------------------------------------
       CARACTERISTIQUES MECANIQUES CALCULEES DES GROUPES D'ETAGES
-----------------------------------------------------------------------

Xg, Yg   : centre de gravité de la section
Xc, Yc   : centre de torsion de la section
Ix', Iy' : inerties principales de la section
Joméga   : aire sectorielle de la section
Jd       : inertie de torsion pure de la section
aire     : surface de la section
alpha    : angle de l'axe principal CX' avec OX (sens positif : sens
           contraire aux aiguilles d'une montre)

Groupe d'étages 1
-----------------
Voiles       Xg,Yg     Xc,Yc       Iy',Ix'   Joméga,Jd      aire   alpha
              (m)       (m)         (m4)      (m6,m4)       (m2)   (deg)

 V1           4.00      4.00    0.8934E+00  0.0000E+00     1.403    -0.1
              9.55     11.00    0.4098E+01  0.1052E-01

 V2          12.00     12.00    0.7402E-09  0.0000E+00     0.870   -15.0
              7.00      7.00    0.2436E+01  0.6522E-02

 V3          20.49     21.76    0.4923E+00  0.1243E+01     1.170     0.0
              8.50      8.50    0.2852E+01  0.8775E-02

Niveau               11.64    0.1500E+01  0.5375E+03                -4.5
Complet               9.66    0.9271E+01  0.2582E-01
```

On voit que les caractéristiques calculées par *Epicentre* sont tout à fait correctes. Elles sont sans doute meilleures que celles du calcul manuel car les directions d'inertie principales sont dans le cas du voile 2 conservées avec l'inclinaison de 15 ° (cf. notre ci-dessus) de ce fait, l'inertie de l'ensemble des voiles est, elle aussi, inclinée par rapport aux axes

Les caractéristiques des voiles sont très proches de celles calculées théoriquement.

On avait des résultats théoriques suivants :

Voile	I_x [m^4]	I_y [m^4]
1	4,0910	0,8949
2	0,0016	2,4389
3	0,4934	2,8562

Les résultats donnés par le logiciel *Epicentre* sont les suivants :

Voile	I_x [m^4]	I_y [m^4]
1	4,0980	0,8934
2	0,0000	2,4360
3	0,4923	2,8520

Ces caractéristiques de calculées sont donc très proches de celles obtenues théoriquement.

- <u>Caractéristiques de l'ensemble de l'étage</u>

Le centre de torsion calculé théoriquement a les coordonnées suivantes :

$$x_c = 11,2608 \text{ m} \qquad \text{et} \qquad y_c = 10,0712 \text{ m}$$

Celles trouvées avec *Epicentre* sont relativement proches bien que pas exactement identiques. On a $x_c = 11,64 \text{ m}$ et $y_c = 9,66 \text{ m}$

Cela n'est gênant que dans la mesure ou l'incidence sur les résultats est notable, ce qui est comparé au paragraphe suivant.

- Répartition des efforts

On obtient avec le logiciel *Epicentre* les répartitions d'efforts suivantes :

Extrait de la note de calcul fournie par Epicentre

```
---------------------------------------------------------------------
              EFFORTS DE CONTREVENTEMENT DANS LES VOILES
---------------------------------------------------------------------

Les efforts sont donnés dans le repère général OXYZ :

Mx : Moment d'axe // OX     (appliqué au centre de flexion du voile)
My : Moment d'axe // OY     (appliqué au centre de flexion du voile)
Tx : Effort tranchant // OX (appliqué au centre de flexion du voile)
Ty : Effort tranchant // OY (appliqué au centre de flexion du voile)
B  : Bimoment               (appliqué au centre de flexion du voile)
N  : Effort axial           (appliqué au centre de gravité du voile)

Les valeurs ci-dessous ne font pas apparaître les sauts d'efforts dus à
l'action des éventuels linteaux connectés au voile au niveau même de la
section : cf. notice (chapitre 7).

Par contre, en cas de changement de section d'un voile avec présence de
poteaux et/ou d'appuis avec d'autres voiles, les tableaux présentent les
efforts au-dessous, au niveau et au-dessus de la section interface, pour
faciliter l'analyse du cheminement des efforts et des contraintes.

---------------------------------------------------------------------
             EFFORTS DE CONTREVENTEMENT DANS LE VOILE 1
---------------------------------------------------------------------

Niveaux      My(kN.m)  Mx(kN.m)      Tx(kN)  Ty(kN)     B(kN.m2)   N(kN)

   0.00        -420.0   -3768.9       -42.0   376.9          0.0     0.0

---------------------------------------------------------------------
             EFFORTS DE CONTREVENTEMENT DANS LE VOILE 2
---------------------------------------------------------------------

Niveaux      My(kN.m)  Mx(kN.m)      Tx(kN)  Ty(kN)     B(kN.m2)   N(kN)

   0.00         622.6   -2324.3        62.3   232.4          0.0     0.0

---------------------------------------------------------------------
             EFFORTS DE CONTREVENTEMENT DANS LE VOILE 3
---------------------------------------------------------------------

Niveaux      My(kN.m)  Mx(kN.m)      Tx(kN)  Ty(kN)     B(kN.m2)   N(kN)

   0.00        -202.6   -3906.8       -20.3   390.7        -31.5     0.0
```

On compare dans le les résultats trouvés lors de l'analyse statique de référence :

Voile	H'_{xi} [kN]		H'_{yi} [kN]	
	Théorie	*Epicentre*	Théorie	*Epicentre*
1	36,34	42,0	358,83	376,9
2	60,41	62,3	225,96	232,4
3	24,07	20,3	415,21	390,7

Tableau 25 : Efforts totaux dans les voiles

On voit bien que la somme des efforts appliqués est égale à la somme des efforts dans les voiles. On a bien $\sum_i H'_{xi} = 0$ et $\sum_i H'_{yi} = 1000\,\mathrm{kN}$. Cela nous rassure sur la validité de ce logiciel !!!

On remarque que les résultats sont relativement proches dans la majorité des cas. La différence relative n'excède pas 6% dans le cas du voile 3.

On peut donc affecter une bonne note de précision statique pour le logiciel *Epicentre.*

- *Analyse dynamique*
  - Précisions concernant la modélisation

On apporte quelques précisions tout d'abord sur la modélisation

Dans Epicentre, il est nécessaire de définir la masse surfacique globale des planchers

- La masse de la dalle alvéolaire, qui dans ce cas est de 450 daN/m², est intégrée dans le modèle sous la forme d'une charge répartie sur l'ensemble de la dalle.
- Les charges d'exploitations : 0,8*1000 = 800 daN/m²
- Le poids des voiles, poteaux et poutres et cloisons : 50 daN/m²

Les hypothèses de calcul sont identiques à celles définies au paragraphe2-2.

- Analyse modale

Les résultats de l'analyse modale sont donnés dans l'extraite de la note finale.

Extrait de la note de calcul fournie par Epicentre

```
-----------------------------------------------------------------------
                    RECAPITULATION DE L'ANALYSE MODALE
-----------------------------------------------------------------------


Pourcentage de masse modale demandé :  90.00 %
Fréquence de coupure                :  33 hertz
Nombre de modes calculés            :   6
Dépassement de la fréquence de coupure par le mode  7 ( 34 hertz)


Masses Modales et Inerties Massiques Modales Effectives
-------------------------------------------------------

Masse totale du bâtiment            :       2302 t
Inertie massique totale du bâtiment :     176055 t.m2


Modes     T(s)            MX(t)              MY(t)             J(t.m2)

  1      0.232       2001  ( 87%)          0  (  0%)          10  (  0%)
  2      0.163          0  (  0%)       1593  ( 69%)         754  (  0%)
  3      0.078         79  (  3%)          5  (  0%)       80159  ( 46%)
  4      0.078        144  (  6%)          3  (  0%)       47086  ( 27%)
  5      0.048         64  (  3%)          0  (  0%)           2  (  0%)
  6      0.038         15  (  1%)          0  (  0%)           0  (  0%)

Cumul                2302  (100%)       1601  ( 70%)      128010  ( 73%)

La masse modale effective maximum est obtenue pour le mode 1 ( 87%)


Facteurs de Direction Modaux
----------------------------

Modes     T(s)         translation/OX     translation/OY         torsion

  1      0.232             100.0%              0.0%                0.0%
  2      0.163               0.0%             99.4%                0.6%
  3      0.078              37.5%              0.4%               62.1%
  4      0.078              62.5%              0.2%               37.3%
  5      0.048             100.0%              0.0%                0.0%
  6      0.038             100.0%              0.0%                0.0%
```

Bien que la note de compte rendu de l'analyse modale soit beaucoup plus synthétique que celles donnée par Arche Ossature et Effel, on rappelle les caractéristiques des

Mode	Direction	Période [s]	Fréquence [Hz]	Masse modale relative [%]
1	X	0,232	4,31	87,0
2	Y	0,163	6,14	69,0
16	Torsion	0,078	12,82	46,0

Tableau 26 : Synthèse de l'analyse modale sous Arche Ossature

Une fois de plus, on peut se rendre compte que les résultats fournis par l'analyse modale sont relativement proches. La fiabilité de ces outils concernant l'analyse modale est donc relativement bonne. Cependant, on voit qu'*Epicentre* traite de façon plus complète le problème de la torsion d'ensemble du bâtiment. Les modes propres de torsion sont avec cet outil explicités de façon beaucoup plus claire et mieux mis en avant. Il reste cependant à observer la façon dont les efforts sont répartis sur l'ensemble de la structure.

- Répartition des efforts dynamiques

Comme avec les outils précédents, on observe les résultats dans deux voiles caractéristiques de la structure.

Extrait de la note de calcul fournie par Epicentre

EFFORTS DE CONTREVENTEMENT DANS LE VOILE 1

Niveaux		My(kN.m)	Mx(kN.m)	Tx(kN)	Ty(kN)	B(kN.m2)	N(kN)
-3.63	1	545.6	870.6	202.7	364.3	6.3	546.0
	2	95.5	11464.9	16.8	1336.9	5.2	607.6
(1)	c	574.2	11726.1	207.8	1446.2	7.8	771.4
0.00	1	33.0	68.5	108.6	241.9	0.5	328.2
	2	57.5	7015.8	56.6	1174.7	2.6	486.8
(1)	c	67.3	7036.4	125.5	1247.3	2.7	585.2
3.63	1	79.2	132.6	75.4	170.6	1.0	146.5
	2	27.5	3374.3	69.4	921.8	0.8	318.8
(1)	c	87.4	3414.1	96.2	973.0	1.3	362.7
7.26	1	101.9	167.4	16.6	54.0	1.2	35.4
	2	5.7	713.1	103.9	435.7	0.4	150.4
(1)	c	103.6	763.3	108.8	451.9	1.4	161.0
10.89	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(1)	c	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

EFFORTS DE CONTREVENTEMENT DANS LE VOILE 8

Niveaux		My(kN.m)	Mx(kN.m)	Tx(kN)	Ty(kN)	B(kN.m2)	N(kN)
-3.63	1	399.4	0.0	216.2	0.0	0.0	0.2
	2	1.2	0.0	4.8	0.0	0.0	65.4
(8)	c	399.8	0.0	217.7	0.0	0.0	65.5
0.00	1	24.2	0.0	206.5	0.0	0.0	0.2
	2	1.2	0.0	12.2	0.0	0.0	57.2
(8)	c	24.6	0.0	210.2	0.0	0.0	57.3
3.63	1	58.1	0.0	153.0	0.0	0.0	0.1
	2	0.6	0.0	15.2	0.0	0.0	42.1
(8)	c	58.2	0.0	157.6	0.0	0.0	42.1
7.26	1	74.6	0.0	82.5	0.0	0.0	0.1
	2	0.1	0.0	22.8	0.0	0.0	22.2
(8)	c	74.7	0.0	89.4	0.0	0.0	22.3
10.89	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(8)	c	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Malgré la clarté de la note de calcul donnée ci-dessus, on regroupe les efforts sur le voile 1.

Cas	Nx	Ty	Mz
G	-	-	-
Q	-	-	-
S X	54,6	36,4	87,1
S Y	60,8	133,7	1 146,4
S	77,1	144,6	1 172,6

Tableau 27 : Efforts dans le Voile 1

La première remarque à faire concerne les cas statiques. Epicentre ne donne pas (pour ce qui est de la version 11, dernière à jour) les efforts des cas statiques. en suite, le cas dynamique 1 correspond au séisme S_x, le cas 2 au séisme S_y et le séisme S_z n'est pas calculé. Le cas S correspond ici à la combinaison de Newmark entre les directions de séisme 1 et 2.

On remarque ensuite que les résultats sont comparables en terme d'efforts horizontaux mais pas en terme de moment appliqué au voile.

En ce qui concerne le voile de façade, la synthèse des efforts donne les résultats suivants :

Cas	Nx	Ty	Mz
G	-	-	-
Q	-	-	-
S X	0,1	21,6	39,9
S Y	6,5	-0,5	0,1
S	6,5	21,8	40,0

Tableau 28 : Efforts dans le Voile 8

Les résultats sont cette fois ci beaucoup plus proches de ceux calculés précédemment.

Cela est rassurant quand à la validité du modèle.

De plus, d'autres calculs ont été menés pour s'assurer de la fiabilité de cet outil et de la modélisation qui était faite. Par exemple dans le cas de l'hôpital de St Julien en Genevois, le bâtiment avait tout d'abord été traité avec la méthode réglementaire applicable aux bâtiments réguliers. Les efforts que l'on peut tirer de cette méthode sont donnés en annexe 3. Il sont à comparer avec ceux de l'annexe 4 pour laquelle l'étude a été faite avec *Epicentre*. Ils sont très comparables, bien que légèrement favorables dans le cas de l'analyse modale faite avec *Epicentre*.

La précision de cet outil est donc jugée comme correcte.

c) Post Traitement

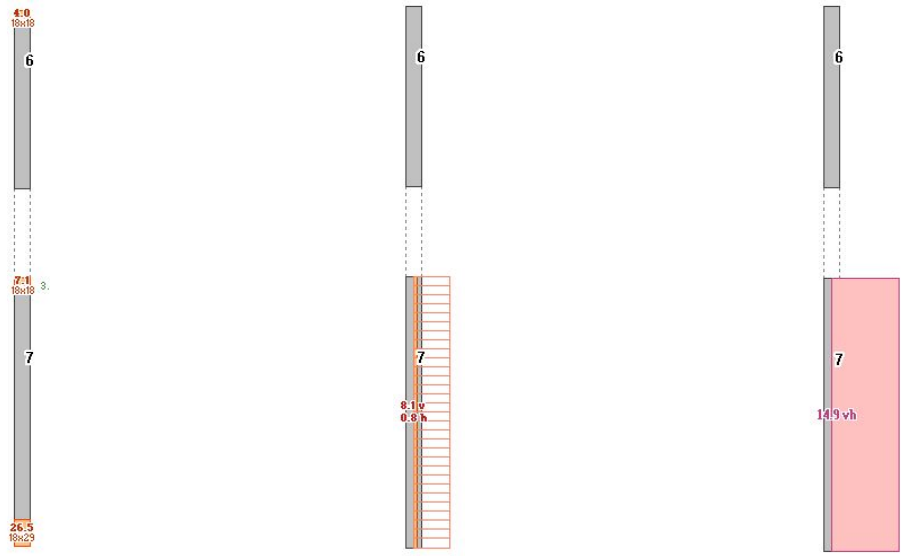
Un module de ferraillage des voiles de contreventement est déjà intégré au logiciel. Le seul point faible de ce module de ferraillage est qu'il implique une double saisie des charges. Comme nous l'avons vu lors des étapes de saisie, il est nécessaire de définir les planchers de référence du bâtiment. On peut penser que naturellement le logiciel va, en plus de la détermination des efforts sismiques faire une descente des efforts statiques. Il n'en est rien.

C'est en fait, à l'heure actuelle, le gros frein à l'utilisation d'*Epicentre*. Il est nécessaire de faire une descente de charge des efforts statiques. Une fois les résultats de la descente de charge statique intégrés dans *Epicentre*, le module de ferraillage des voiles est opérationnel.

Ce module de ferraillage permet de faire les calculs des sections d'acier à mettre en place pour chaque voile, à travers d'une sortie graphique qui est très agréable.

On voit sur l'illustration ci dessous un exemple de sortie de ferraillage. Les sections d'acier à mettre en place sont rappelées, ainsi que la dimension du potelet dans lequel on doit placer cette section d'acier.

Il est aussi possible d'obtenir les sections d'acier nécessaire pour la vérification à l'effort tranchant et pour la vérification du non glissement de la section.



Aciers de Flexion ***Aciers de Cisaillement*** ***Aciers de Glissement***

Ce module de ferraillage nous dispense donc de tout post traitement, si ce n'est le ferraillage des linteaux. La vérification des voiles telle qu'elle est décrite dans le Chapitre 4. Il est cependant regrettable qu'il ne soit accessible qu'après avoir saisi pour chacun des voiles les efforts statiques.

D'après la pré version diffusées par M. HENIN[1], la prochaine version d'Epicentre couplera la description des planchers de référence avec une saisie des charges plus complète. Elle permettra de plus d'avoir une descente de charge statique traditionnelle.

Le calcul du ferraillage et de la composante d'Epicentre seront donc plus facilement réalisables.

[1] Editeur du logiciel *Epicentre*

d) Coût

Epicentre est le logiciel le moins cher de la sélection. Les coûts d'acquisition et de mise à jour sont les suivants :

	Prix HT (€)	Prix TTC (€)
1 Licence	5 000	5 980
Mise à jour	750	897
Support technique	Inclus dans les mises à jour	
Total	**5 750**	**6 880**

Tableau 29 : Coûts du logiciel Epicentre

Dans le cas d'*Epicentre*, il n'est pas nécessaire de prévoir de formation. Même dans le cas d'ingénieur débutant (ce qui est quasiment mon cas) la prise en main de l'outil est très rapide. Après une journée d'autoformation nécessaire à comprendre le fonctionnement du logiciel, j'ai pu modéliser seul des bâtiments même de géométrie complexe.

e) Polyvalence de l'outil

La polyvalence est le critère le moins bon d'*Epicentre*. Il n'est en effet pas possible de traiter tous les cas possibles de bâtiment à l'aide de ce logiciel. On ne peut pas traiter par exemple les bâtiments présentant des phénomènes de couplages entre degrés de liberté (cf. Chapitre 3 -1-2b).

Un autre critère restrictif élimine les structures fondées sur des pieux. Bien qu'il soit possible d'ajouter des pieux comme système de fondations, les résultats fournis ne nous permettent pas de conclure quand à la concomitance des efforts sur les fondations. Cela touche particulièrement les structures pour lesquelles un pieux ou u groupe de pieux appartient à deux voiles séparés. Ne connaissant pas la simultanéité des efforts de chaque voile sur le pieu, il n'est pas possible de dimensionner la fondation. Ce problème est dû à la combinaison de la réponse des

Tout d'abord le logiciel ne permet de calculer que les bâtiments qui sont entièrement contreventés par des voiles. Les structures au contreventement mixte Voile - Portique ne pourront donc pas être traitées.

De par le fonctionnement du calcul, il est possible de traiter des structures mixtes, pour autant que la partie métallique ne participe pas au contreventement de la structure. Il est par exemple tout a fait possible de traiter des planchers mixtes car seule la masse surfacique des planchers est saisie. Par hypothèse, les planchers sont

indéformables, les problèmes de description de masse et de raideur des profilés métalliques ne se pose pas avec *Epicentre*.

Je choisis donc d'attribuer une note de polyvalence de 1,5 qui est intermédiaire entre les deux cas.

Compte tenu des hypothèses retenues pour le calcul, en ce qui concerne la raideur des voiles par exemple, les bâtiments très fortement contreventés et de faible élancement ne peuvent être traités. On ne pourra utiliser *Epicentre* que dans le cas des bâtiments qui sont relativement élancés en hauteur.

On peut donc donner les résultas de polyvalence dans le tableau suivant :

Critère	**Résultat**
Type de Contreventement	Voile 1
Matériaux possibles	Béton / (Métal) = 1,5
Directions de calcul de l'analyse modale	Horizontale et verticale = 2
Total	**4,5**

Tableau 30 : Polyvalence d'Epicentre

Le logiciel *Epicentre* obtient une note de **polyvalence de 4,5**

f) Synthèse des résultats et commentaires :

Critère	Valeur
Rapidité	4
Précision	Bonne
Post traitement	Moyen
Coût	5 750
Polyvalence	4,5

Tableau 31 : Synthèse des résultats pour Epicentre

On rappelle les avantages et inconvénients relevés lors de cette étude pour le logiciel *Epicentre*.

Avantages :

- Simple
- Rapide
- Economique
- Très proche des exigences réglementaires

Inconvénient

- Polyvalence restreinte
- Efforts de l'analyse dynamique non signés.
- Ferraillage des voiles accessibles seulement après une descente de charge extérieure.

4-4 Synthèse des résultats sur l'ensemble des outils

On regroupe dans le tableau ci-dessous les résultats pour l'ensemble des critères et des outils examinés.

Outil	Rapidité	Précision	Post Traitement	Coût	Polyvalence
Arche Ossature	17	Moyenne	Bon	11 880	6
Effel	18	Bonne	Bon	10 075	7
Epicentre	3	Bonne	Moyen	5 750	4,5

Tableau 32 : Synthèse des résultats

On pourra tirer plusieurs conclusions à la lecture de ce tableau.

La première concerne l'utilisation des éléments finis. On a vu dans le cadre de l'analyse statique, que malgré une grande attention portée au modèle, les résultats n'étaient pas forcément très corrects. Cela pose un premier doute sur la fiabilité des calculs faits sur de très gros modèles comportant bien plus de 3 voiles et une dalle.

De plus, la grande lourdeur, malgré l'augmentation de la performance des ordinateurs, peut devenir un sérieux obstacle au traitement des structures tridimensionnelles complexes.

La seconde, plus précisément destinée aux calculs sismiques concerne le positionnement d'*Epicentre* dans un bureau d'études. On peut voire que cet outil possède de très nombreux avantages. Sa grande simplicité, sa bonne précision et surtout sa grande rapidité en font un outil qui trouvera une place de choix dans tous les bureaux d'étude qui traitent ce genre de structures.

Cependant il faut mettre un bémol quand à une utilisation systématique d'*Epicentre*. Malheureusement, un manque de polyvalence certain impose tout de même l'utilisation d'autres outils de calcul plus complexes.

Chapitre 4 - Développement du post-traitement

Le post traitement est l'étape indispensable qui conduit au ferraillage et à la vérification selon le règlement en application des éléments de la structure.

Dans ce chapitre traitant du post traitement, je vous exposerai deux parties sur lesquelles j'ai eu à faire un peu de développement d'outils de calculs. La vérification réglementaire des voiles de contreventement ainsi que la détermination des efforts dus à la poussée dynamique des terres sera exposée.

1 Calcul du ferraillage des voiles de contreventement

Bien que les outils de post traitement utilisés avec *Arche Ossature* et *Effel* permettent de traiter et de calculer le ferraillage des voiles de contreventement, j'ai été amené à développer un outil permettant le ferraillage des voiles de contreventement suivant les règles PS 92.

Un article entier traite du calcul du ferraillage des voiles de contreventement. Il s'agit de l'article 11.82 du règlement. La démarche adoptée pour ce calcul de ferraillage est la suivante : dans un premier temps on vérifie les contraintes normales, ensuite les contraintes tangentielles sont examinées. Enfin, un exemple de calcul sera montré à l'aide d'une feuille de calcul Excel.

1-1 Rappel des combinaisons d'action

Les combinaisons d'action à envisager sont celles décrites à l'article 8.1 du règlement.

Dans les cas les plus courant où n'interviennent que des charges de poids mort, d'exploitation, de neige et de vent, les combinaisons accidentelles sont les suivantes :

$$S_{1u} = G + 0,8Q + E + 0,1N$$
$$S'_{1u} = G + E + 0,3N$$
$$S_{2u} = G + 0,4Q + E + 0,2N$$

On rappelle que : *G* correspond aux cas de charges permanentes
Q aux cas de charges d'exploitation
E aux cas de charge d'action sismique
N aux cas de charge de neige

Les actions sismiques ne sont jamais combinées avec les actions de vent.

L'action sismique est obtenue par combinaison des réponses dans les différentes directions de calcul (S_x, S_y et S_z) selon les combinaisons dites de Newmark :

$$E = \pm S_x \pm \lambda S_y \pm \mu S_y$$
$$E = \pm \lambda S_x \pm S_y \pm \mu S_y$$
$$E = \pm \lambda S_x \pm \mu S_y \pm S_y$$

Avec les valeurs $\lambda = \mu = 0,3$.

Cela donne un ensemble de 48 cas de charges d'action sismique donc de façon théorique 144 combinaisons d'actions à envisager. On se rend alors compte de toute la pénibilité du calcul sismique. Heureusement les outils informatiques sont là pour gagner du temps de calcul.

1-2 Vérification des contraintes normales

La contrainte maximale admissible dans les matériaux est :

- Dans le béton : $\sigma_{\mathrm{bc}} = \dfrac{0,85 f_{\mathrm{cj}}}{1,15 \gamma_{\mathrm{f}}}$ avec $\gamma_{\mathrm{f}} = 1,3$.
- Dans l'acier : $\sigma_{\mathrm{s}} = \dfrac{f_{\mathrm{e}}}{\gamma_{\mathrm{s}}}$ avec $\gamma_{\mathrm{f}} = 1,0$.

Le pourcentage mini de ferraillage placé à l'extrémité des voiles doit être supérieur à la valeur suivante :

$\rho = 0 \quad \text{si} \quad \rho_1 \leq 0,001$
$\rho = 0 \quad \text{si} \quad \rho_1 > 0,001$ avec $\rho_1 = 0,001 \cdot q \cdot \dfrac{\sigma}{\sigma_{\mathrm{bc}}}$ et σ la contrainte moyenne de compression.

Le ferraillage longitudinal placé à l'extrémité du trumeau doit être réparti sur une largeur au plus égale à la largeur : $\mathrm{b_f} = \min\left(b/2 ; 100\,\mathrm{cm}\right)$.

1-3 Vérification à l'effort tranchant

La vérification à l'effort tranchant se fait en deux temps. Dans un premier temps, la vérification porte sur la contrainte de cisaillement ensuite, on effectue ce qui est couramment appelé la vérification du non glissement du voile.

a) *Vérification du cisaillement*

La vérification de cisaillement consiste à s'assurer que dans le cas ou le cisaillement est excessif, une section d'acier complémentaire est mise en place pour s'assurer de la stabilité du voile.

On voit dans la figure ci-dessous la géométrie et les notations employées pour le calcul.

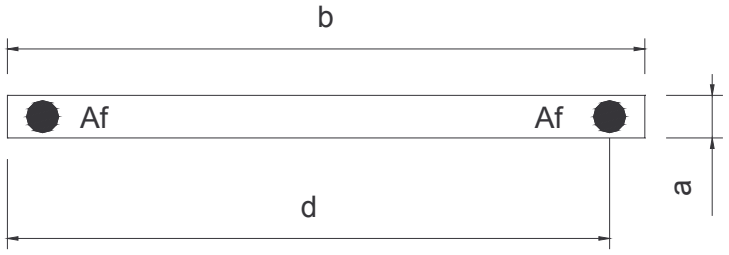


Figure 19 : Géométrie de la section

La section d'armatures de flexion ou de chaînage est A_f. Le pourcentage associé est $\overline{\omega}_f = 100\dfrac{A_f}{ad}$

Les sollicitations sur la section sont les suivantes :

Effort Normal	N
Moment de flexion	M
Effort tranchant appliqué	V
Effort tranchant	$V^* = V\left(\dfrac{1+q}{2}\right)$

Les contraintes associées à ces efforts sont alors les suivantes :

Contraintes normales $\sigma = \dfrac{N}{ad}$.

$Si\,\sigma \geq 0,5 f_{tj}$, le trumeau doit être vérifié comme un poteau.

Contraintes de cisaillement $\tau^* = \dfrac{V^*}{ad}$

Excentricité de l'effort normal $\alpha_n = \dfrac{M}{bN}$

Elancement de calcul $\alpha_v = \dfrac{M}{bV^*}$

On calcule le moment pour qu'apparaisse la première fissure dans le voile :

$$M_{\lim} = \frac{ab^2}{6}\left(\sigma + f_{tj}/1,5\right)$$

Et la contrainte de cisaillement conventionnel associée à ce moment

$$\tau_1 = \tau^* \cdot \frac{M_{\lim}}{M}$$

On définit la contrainte limite de fissuration à l'effort tranchant :

$$\tau_2 = 0,45\sqrt{f_{tj}\left(f_{tj} + \frac{2}{3}\sigma\right)}$$

La contrainte limite de résistance à l'effort tranchant après fissuration sera donc, compte tenu des aciers de flexion :

$\tau_3 = \min\left(\tau_1, \tau_2\right)\cdot\left(1 + 3\omega_f\right) + 0,15\sigma$ où la valeur de ω_f est limitée à 2%.

Le ferraillage complémentaire à prévoir lorsque la contrainte τ^* dépasse la valeur suivante : $\tau_{\lim} = \max\left(\tau_3, \dfrac{f_{tj}}{2}\right)$.

La section d'acier à prévoir est alors : $\dfrac{A_t}{s_t} = \dfrac{a\left(\tau^* - \tau_{\lim}\right)}{0,9 f_e / \gamma_s}$

On dispose cette section	Horizontalement si	$\alpha_v \geq 1,5$
	Verticalement si	$\alpha_v \leq 0,5$
	Horizontalement et Verticalement si	$0,5 < \alpha_v < 1,5$

b) Vérification du non glissement

La vérification du non glissement consiste à s'assurer de la stabilité horizontale du voile sous l'effet des efforts horizontaux.

On désigne par *x* la largeur comprimée du voile, Fa l'effort de traction dans les aciers et Fb l'effort de compression sur le béton.

La vérification du non glissement consiste à s'assurer que l'inégalité suivante est respectée : $V^* \leq 0{,}35axf_{tj} + \left(F_b + A'f_e\right)\tan\varphi$

Avec: $\tan\varphi = 0{,}7$

f_e = limite élastique des aciers des aciers *A'*

A' : armatures verticales réparties hors membrures d'extrémité existant dans la section *a* x *b* à laquelle est associé une quantité d'armatures horizontales respectant le même pourcentage

F_b : résultante des contraintes de compression dans le béton.

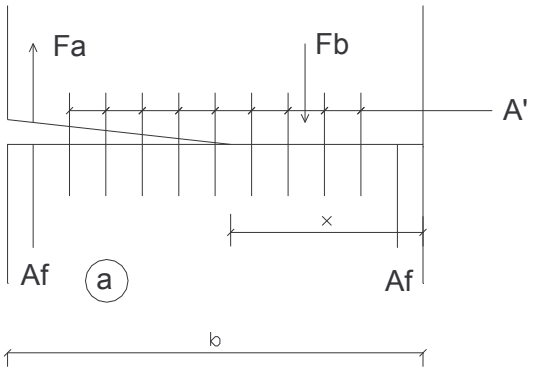


Figure 20 : Vérification du non glissement

Une remarque est cependant nécessaire. On voit dans le cas de la vérification du non glissement que la section des aciers A_f intervient dans le calcul.

Il se pose alors la question de la détermination de cette section d'acier. Dans le cadre de la feuille de calcul que j'ai développé ci-dessous, cette section est calculée en utilisant une modélisation du voile par une bielle de compression du béton et deux tirants. Le premier étant inférieur et placé le long de la face inférieure du voile, le second est vertical et représente la section d'acier A_f.

Une seconde méthode de calcul consisterai à calculer le voile comme une poutre en flexion composée.

1-4 Exemple de calcul

L'exemple de calcul concerne un voile de contreventement de l'hôpital de St Julien en Genevois. Le bâtiment est entièrement contreventé par des voiles, la structure horizontale est mixte Acier – Béton.

On voit sur la page suivante le calcul qui est mené et les vérifications faites.

Voiles en zone sismique – Cas des murs non raidis

AFFAIRE : Hopital St Julien NUMERO : 649

Voile No: 10

MATERIAUX

fc28 (MPa) =	30	MPa	γ_f = 1.3
fe (MPa) =	500	MPa	
Aw =	0	cm²/ml	
Af =	10.35	cm²	
Date d'application des charges :	1		
Type de mur θ :	1		

DONNEES GEOMETRIQUES:

h =	3.10	ml
b =	5.03	ml
d =	4.83	ml
a =	0.20	ml

CHARGEMENT dû aux charges permanentes et d'exploitations

Ng =	545.00	kN	
Mg =	173.00	kN.m	
Nq =	361.00	kN	ω_{11} = 0.80
Mq =	73.00	kN.m	

CHARGEMENT sismique

N_S =	0.00	kN	
T_S =	675.20	kN	q = 1.7
M_S =	4921.00	kN.m	
T* =	911.52	kN	

II - Justification sous sollicitations sismiques

σ_{bc} = 17.06 MPa
f_{tj} = 2.40 MPa

a/ Dimensionnement - Schéma Bielle / Tirant

tg θ = 0.64
b = 0.80 m
σ = 6.77 MPa

Tirant Horizontal A_h = 18.23 cm²
Tirant Vertical A_v = 11.70 cm²

b/ Vérification à l'effort tranchant

b-1/ Vérification de cisaillement

ϖ_t = 0.12% % <=2%

- On définit :	CAS G+ω_{11}*Q+E			CAS G+E	
N =	833.80	kN		545.00	kN
M =	5152.40	kN.m		5094.00	kN.m
σ =	0.83	MPa	OK	0.54	MPa
α_v =	1.12	ss unité		1.11	ss unité

- On calcule :

M_{lim} =	2048.38	kN.m	M_{lim} =	1806.27	kN.m
τ_1 =	0.38	MPa	τ_1 =	0.33	MPa
τ_2 =	1.20	MPa	τ_2 =	1.16	MPa
τ_3 =	0.50	MPa	τ_3 =	0.42	MPa
τ_{lim} =	1.20	MPa	τ_{lim} =	1.20	MPa
τ^* =	0.94	MPa	τ^* =	0.94	MPa
	Pas besoin d'At			**Pas besoin d'At**	

- Section d'armatures transversales

S_t =	1.00	ml		1.00	ml
A_t =	0	cm²/ml		0	cm²/ml
	armature verticale et horizontale			armature verticale et horizontale	

b-2/ Vérification de non glissement

x =	**0.80**	ml		**0.76**	ml
A' =	**14.23**	cm2		**14.23**	cm2
F_b =	**2.73**	MN		**2.60**	MN
tg φ =	**0.70**			**0.70**	

On doit vérifier : $T^* <= 0{,}35*f_1*a*x + (F_b + A'*f_e)*tg\ \varphi$

911.52	<	2408.55	MN	2320.19	
		OK		**OK**	

2 Calcul de la poussée dynamique des terres

On distingue généralement trois types de murs de soutènement.

Tout d'abord les murs poids qui assurent leur équilibre par la grande masse de béton qui les compose. L'équilibre horizontal est assuré par le frottement de la face inférieure sur le sol.

Ensuite les murs de soutènement non déplaçables dont la stabilité est assurée par les réactions fournies par les ouvrages situées en aval du parement. Il s'agit des voiles périphériques des sous-sols des bâtiments.

Enfin, les parois ancrées dont la stabilité est assurée par les réactions fournies par les tirants d'ancrage.

Dans le cadre de ce rapport, nous allons nous occuper uniquement des parois des sous-sols des bâtiments. Le PS 92 au paragraphe 10.21 ainsi que « la construction en zone » sismique [1]» présentent la méthode de Mononobé – Okabé.

Cette méthode nous permet de déterminer la poussée dynamique des terres et des surcharges appliquées à la surface du terrain sur la paroi de soutènement.

On va donc découper l'étude de la poussée dynamique des terres suivant plusieurs axes. Dans un premier temps, nous étudierons la poussée dynamique des terres dans le cas de sols non saturés, ensuite nous examinerons le cas des terrains saturés et enfin nous nous préoccuperons de la poussée de la surcharge appliquée sur la surface du sol.

Généralement, la géométrie du problème est la suivante :

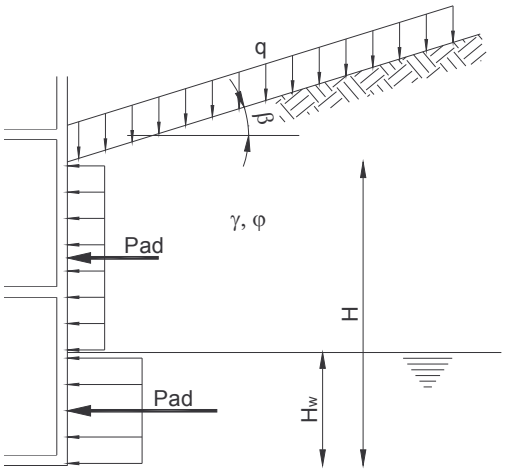


Figure 21 : Géométrie du problème

[1] Cf. Bibliographie

2-1 La poussée dynamique du sol non saturé

La résultante de la poussée est calculée de la façon suivante:

$$P_{ab} = \frac{1}{2} \cdot \gamma H^2 (1 \pm \sigma_v) K_{ad}$$

K_{ad} est le coefficient de poussée dynamique des terres, il s'exprime à l'aide de la relation:

$$K_{\mathrm{ad}} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta)}{\cos^2(\theta)} \cdot \frac{1}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin\varphi \cdot \sin(\varphi - \beta - \theta)}{\cos\theta \cdot \cos\beta}}\right]^2}$$

γ	Poids volumique du sol non déjaugé
φ	Angle de frottement interne du terrain soutenu
H	Hauteur de la paroi
β	Angle du terre-plein avec l'horizontale
δ	Angle de frottement du terrain sur la paroi, pris nul
$\sigma_{\mathrm{h}} = K\tau \frac{a_{\mathrm{n}}}{g}$	Coefficient sismique horizontal (% de g), avec K = 1,2 dans le cas des ouvrages non déplaçables
τ	Coefficient d'amplification topographique, généralement égal à 1
$\sigma_{\mathrm{v}} = 0{,}3\sigma_{\mathrm{h}}$	Coefficient sismique vertical (% de g)
$\theta = \arctan\left(\frac{\sigma_{\mathrm{v}}}{1 \pm \sigma_{\mathrm{v}}}\right)$	est l'angle apparent avec la verticale de la résultante des forces des masses appliquées au remblai contenu par le mur sous excitation sismique

La poussée dynamique s'exerce à mi hauteur du voile enterré et la répartition des efforts est uniforme.

2-2 Poussée dynamique du sol saturé

Ce qui diffère entre la poussée du sol saturé et la poussée du sol non saturé est relativement mince en terme de calculs.

Pour les sols saturés, on considérera uniquement le poids volumique du sol déjaugé à la place du poids du sol non déjaugé. L'expression de la résultante devient :

$$P_{\mathrm{ad}} = \frac{1}{2}(\gamma - \gamma_{\mathrm{w}})H^2(1+\sigma_{\mathrm{v}})K_{\mathrm{ad}}$$

On adopte aussi l'angle θ en considérant la présence de l'eau : $\tan\theta' = \frac{\sigma_{\mathrm{h}}}{1 \pm \sigma_{\mathrm{v}}} \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_{\mathrm{w}}}$

On devra cependant superposer à la poussée du sol saturé la poussée hydrostatique du fluide.

2-3 Poussée dynamique du sol du à la surcharge

Pour le calcul de l'effet de la surcharge sur le voile de soutènement, un méthode analogue pour la détermination de K_{ad}. Seule le calcul de la résultante diffère.

$$P_{\mathrm{ad}} = \frac{qH}{\cos\beta}(1 \pm \sigma_{\mathrm{v}})K_{\mathrm{ad}}$$

La valeur de K_{ad} est identique à celle calculée dans le cas de la poussée dynamique du sol non saturé.

2-4 Exemple de calcul

L'exemple de calcul concerne un voile du sous sol de l'hôpital de St Julien en Genevois.

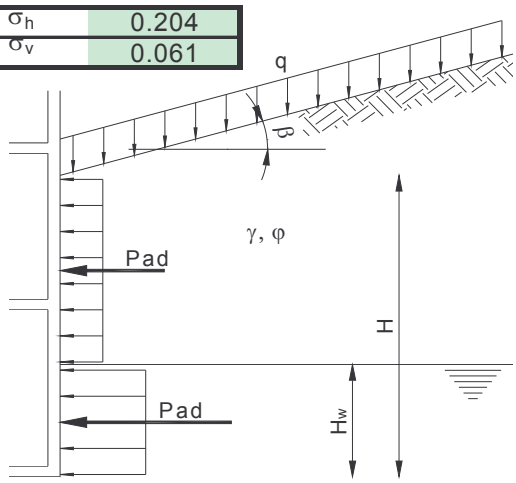
On calculera donc la poussée dynamique des terres sur ce voile par la méthode qui est exposée ci-dessus.

Affaire : **Hopital St Julien**
Voile 3

Paramètres Sismiques

Zone Sismique	Ib
Classe de l'ouvrage	C
Site	S2
Amplification topographique τ	1

σ_h	0.204
σ_v	0.061



Paramètres Géotechniques

Hauteur de la paroi	H [m]	3.65
Hauteur d'eau	H_w [m]	1.20
Surcharge sur le remblais	q [kN/m²]	3.50
Angle du remblais	β [°]	0.00
Poids volumique	γ [kN/m³]	18.00
Frottement interne du sol	φ [°]	30.00

Coefficients de Pousée

		$\sigma_v > 0$	$\sigma_v < 0$
sol sec	K_{ad}^{d}	0.467	0.488
sol saturé	K_{ad}^{h}	0.749	0.862

Efforts Appliqués

		$\sigma_v > 0$		$\sigma_v < 0$	
		Effort [kN/m]	Point d'app.	Effort [kN/m]	Point d'app.
sol sec	P_{ad}^{d}	26.75	2.43	24.76	2.43
sol saturé	P_{ad}^{h}	4.58	0.60	5.27	0.60
Charge d'exploitation	P_{qd}	6.33	1.83	5.85	1.83
Poussée Hydrostatique	P_{hs}	7.20	0.40	7.20	0.40

Chapitre 5 - Exemple d'une note de calcul de structure en zone sismique

Pour alléger le texte, l'exemple de note sismique est en Annexe 4.

On pourra y lire le résumé des hypothèses sismiques, les résultats de l'analyse modale ainsi que les efforts dans chacun des éléments participant à la résistance de la structure sous les actions sismiques.

Conclusion

On peut tirer plusieurs conclusions à la suite de ce rapport.

Le calcul en zone sismique devient une nouvelle contrainte pour les bureaux d'étude et de nombreux outils sont présents pour y faire face. Malheureusement, comme vous avez pu le comprendre à la lecture de ce rapport, la solution miracle n'existe pas.

Arche Ossature apporte une grande facilité d'emplois, la possibilité d'être utilisé en dehors des zones sismiques pour faire des calculs de structure traditionnels, mais son emploi en zone sismique reste hasardeux en raison d'un modèle aux éléments finis peu modulable.

Effel par contre est un logiciel très puissant, polyvalent. Il permet de faire des calculs de structure non linéaires et offre de vastes possibilités en ce qui concerne la maîtrise du maillage et des éléments finis employés. Cependant, revers de la médaille oblige, il est complexe à maîtriser, et les phases d'exploitation des résultats sont très lourdes.

Epicentre est plus léger, plus facile à prendre en main et fournit des résultats aussi fiables (si ce n'est plus) que ceux des codes complexes aux éléments finis. Malheureusement, il a aussi des inconvénients. On pourra regretter par exemple sa faible polyvalence qui limite son emploi exclusif, ainsi que l'absence de descente de charges statiques qui rend le calcul de ferraillage impossible.

L'outil parfait reste sans doute à développer, il devrait sans doute reprendre les avantages de chacun des précédents c'est-à-dire être rapide, simple peu cher et précis.

Peut être la prochaine version d'*Epicentre* qui inclura la descente de charge statique ira dans ce sens…

Bibliographie

- **Règles de construction parasismique** – Norme NF P 06-013, Eyrolles, 1995
- **La construction en zone sismique**, V. DAVIDOVICI, Le Moniteur, 1999
- **Construire parasismique,** Milan Zacek, Editions Parenthèses, 1996
- **Formulaire du Béton Armé (tomes 1 et 2)**, V. DAVIDOVICI, Le Moniteur, 1995
- **Ossatures des Bâtiments**, A. COIN, Eyrolles, 1996
- **Conception et calcul des structures de bâtiments (tomes 1 à 6),** Henry Thonier, Presses des Ponts et Chaussées, 1993 à 1998.
- **Calcul pratique des tours en Béton Armé,** Marius DIVER, Dunod,

Table des annexes :

Annexe 1 : Description de la méthode de calcul par la matrice de transfert

Annexe 2 : Résultats de l'analyse dynamique avec le logiciel Arche Ossature.

Annexe 3 : Calcul par la méthode forfaitaire de l'hôpital de Saint Julien en Genevois.

Annexe 4 : Note de calcul sismique de l'hôpital de Saint Julien en Genevois.

Annexe I : Description de la méthode de calcul par la matrice de transfert

Annexe 2 : Résultats de l'analyse dynamique avec le logiciel Arche Ossature.

Annexe 3 : Calcul par la méthode forfaitaire de l'hôpital de Saint Julien en Genevois.

Annexe 4 : Note de calcul sismique de l'hôpital de Saint Julien en Genevois.